

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE  
E NANOSSÍLICA NO TEMPO ZERO DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA PELA TÉCNICA DO ULTRASSOM**

**JULIANA GONÇALVES BORGES**  
**LUIZ AUGUSTO GIMENEZ AIDAR**

**ORIENTADOR: EUGÊNIA FONSECA DA SILVA**  
**CO-ORIENTADOR: MANUEL ALEJANDRO ROJAS MANZANO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS  
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS**

**BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2016**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE POLÍMERO SUPERABSORVENTE  
E NANOSSÍLICA NO TEMPO ZERO DE CONCRETOS DE ALTA  
RESISTÊNCIA PELA TÉCNICA DO ULTRASSOM**

**JULIANA GONÇALVES BORGES  
LUIZ AUGUSTO GIMENEZ AIDAR**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**EUGÊNIA FONSECA DA SILVA, D. Sc. (UnB)  
(ORIENTADORA)**

---

**VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, D. Sc. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**PAULO FRANCINETE SILVA JÚNIOR, M. Sc. (IFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 03 de JUNHO de 2016.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

BORGES, JULIANA GONÇALVES; AIDAR, LUIZ AUGUSTO GIMENEZ.  
Determinação do tempo zero de microconcreto de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e nanossílica [Distrito Federal] 2016.  
x, 56 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2016)  
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto de alta resistência	2. Tempo zero
3. Ultrassom	4. Polímero superabsorvente
I. ENC/FT/UnB	5. Nanossílica

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BORGES, J.G.; AIDAR, L.A.G. (2016). Avaliação da adição de polímero superabsorvente e nanossílica no tempo zero de concretos de alta resistência pela técnica do ultrassom. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 56 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Juliana Gonçalves Borges e Luiz Augusto Gimenez Aidar

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Determinação do tempo zero de microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e nanossílica

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Juliana Gonçalves Borges  
SRES Quadra 10, Bloco G-1, Casa 55  
70645-071 – Brasília/DF - Brasil

---

Luiz Augusto Gimenez Aidar  
SQN 412, Bloco N, Apartamento 205  
70867-140 – Brasília/DF - Brasil

## RESUMO

As diversas vantagens do concreto de alta resistência (CAR) vêm tornando o seu uso cada vez mais comum no campo da construção civil. Dentre elas, destacam-se a elevada resistência à compressão e a densa microestrutura. Entretanto, essa rede mais refinada de poros deixa o CAR mais suscetível a ação da retração autógena (RA), a qual pode causar danos significativos ao CAR a partir do momento em que ocorre a transição do estado fluido para o sólido. Nesse sentido, este trabalho enquadra-se na linha de pesquisa desenvolvida na Universidade de Brasília (UnB), a qual tem como objetivo o estudo de estratégias mitigadoras da retração autógena em CARs. Tal linha de pesquisa adota o uso de polímero superabsorvente (PSA) como agente de cura interna para mitigar a RA. Outros trabalhos dessa linha, porém, identificaram uma redução das propriedades mecânicas devido a adição desse tipo de polímero. A fim de se contrabalancear essa desvantagem do PSA, a linha avança para a adição de nanossílica (NS) devido aos, já comprovados em outros trabalhos, benefícios trazidos por esta às propriedades mecânicas. O estudo aqui proposto destina-se a determinar o tempo zero a partir do qual o CAR apresenta comportamento sólido e se dá início à determinação experimental da RA. A metodologia para determinação do tempo zero utilizada neste trabalho foi a do pulso ultrassônico, desenvolvida por SILVA (2007). O propósito deste trabalho é avaliar a influência das adições de PSA e NS no tempo zero de microconcretos e, para tal, tomar-se-á seis misturas de microconcreto de alta resistência ( $a/c$  fixa = 0,3): duas contendo apenas adição de nanossílica – de 1% e de 2% – e outras quatro combinando-se os teores de 1% e 2% de nanossílica com os teores de 0,2% e 0,3% de polímero superabsorvente. Além destas, outras misturas realizadas por MANZANO (2014) são utilizadas como referência para comparação dos resultados. São estas misturas: uma de referência com relação  $a/c = 0,3$  (sem adições de PSA ou NS) e duas contendo apenas adição de polímero superabsorvente – de 0,2% e de 0,3%. Os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram constatar que a adição de PSA tende a aumentar o tempo zero dos microconcretos em relação ao traço de referência, enquanto a adição de NS tende a diminuí-lo, sendo o efeito desta última consideravelmente superior ao da primeira. A combinação das adições mostrou ainda a ocorrência de uma superposição dos efeitos, causando, no total, uma redução do  $t_0$ . A pesquisa serviu também para corroborar a eficiência da técnica do ultrassom.

**Palavras-chave:** concreto de alta resistência, tempo zero, ultrassom, polímero superabsorvente, nanossílica.

## SUMÁRIO

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ABRANGÊNCIA E IMPORTÂNCIA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GERAL	2
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)	3
2.1.1 RETRAÇÃO AUTÓGENA	3
2.1.2 TEMPO ZERO	6
2.1.2.1 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA TRANSIÇÃO SUSPENSÃO-SÓLIDO	7
2.1.3 ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA	9
2.2 POLÍMEROS SUPERABSORVENTES (PSAs)	10
2.2.1 MECANISMO DO PSA	11
2.2.2 EFEITOS DO PSA NO MICROCONCRETO	13
2.2.2.1 EFEITO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA	13
2.2.2.2 EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	16
2.2.2.3 EFEITO NO TEMPO ZERO	18
2.3 NANOSSÍLICA (NS)	20
2.3.1 APLICAÇÕES EM MEIOS CIMENTÍCIOS	21
2.3.2 EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	21
2.3.3 EFEITO NO TEMPO ZERO	23

3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	25
3.1	MATERIAIS CONSTITUINTES	26
3.1.1	CIMENTO	26
3.1.2	ÁGUA	28
3.1.3	AREIA	28
3.1.4	SÍLICA ATIVA	29
3.1.5	SUPERPLASTIFICANTE	29
3.1.6	POLÍMERO SUPERABSORVENTE (PSA)	30
3.1.7	NANOSSÍLICA (NS)	31
3.2	FABRICAÇÃO DOS MICROCONCRETOS	31
3.3	ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRASSÔNICO	35
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	39
4.1	TEMPO ZERO	39
4.2	INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PSA AO MICROCONCRETO	41
4.3	INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA AO MICROCONCRETO	43
4.4	INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO COMBINADA DE PSA E NANOSSÍLICA AO MICROCONCRETO	44
5	CONCLUSÃO	48
5.1	SINOPSE E CONCLUSÃO	48
5.2	SUSGETÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação do fenômeno da retração autógena no tubo capilar. (a) capilar completamente saturado com umidade relativa interna (UR) igual a 100 %; (b) capilar parcialmente saturado, mostrando a saída de água para a reação de hidratação e  $UR < 100\%$ ; (c) no detalhe: a região ar-água dentro do capilar e a representação das componentes da tensão superficial e consequente tensão induzida de tração; (d) representação da componente horizontal de tensão superficial, que faz encolher o poro, e da componente vertical, que faz encurtar o poro. (RÊGO E AKITAYA, 2010). 4

Figura 2.2: Esquema do conceito de patamar de percolação (ACKER, 1988 adaptado por SILVA, 2007). 7

Figura 2.3: Polímero superabsorvente seco e hidratado (TRAMFLOC, 2014). 10

Figura 2.4: Estrutura da poliacrilamida e do poliacrilato de Sódio, onde “H”, “C”, “O”, “N” e “Na” representam átomos de Hidrogênio, Carbono, Oxigênio, Nitrogênio e Sódio, respectivamente. 12

Figura 2.5: Retração autógena dos três traços: referência, PSA 0,3% e PSA 0,6% (TRALDI E AGUIRRE, 2013). 14

Figura 2.6: Resultados médios de retração autógena encontrados para PSA1, PSA2 e traço referência (PEREIRA e MATOS, 2011) 16

Figura 2.7: Curvas de velocidade da onda ultrassônica em função do tempo para os microconcretos de referência, com 0,3% de PSA tipo C e 0,6% de PSA tipo C (TRALDI e AGUIRRE, 2014) 19

Figura 2.8: Efeito da melhoria na resistência à compressão das misturas com incorporação de nanossílica (CNS) e sílica ativa (SF), em relação à resistência (HOU *et al.*, 2013). 22

Figura 2.9: Resultados da calorimetria em pastas de cimento com nanossílica,  $a/c = 0,30$  (KONG, et al, 2013). 24

Figura 3.1: Curva granulométrica da areia utilizada 28

Figura 3.2: Modo de armazenamento dos materiais secos: (a) cimento e (b) areia. 32

Figura 3.3: Balanças utilizadas para as pesagens dos materiais: (a) balança para grandes massas (precisão de 0,01 kg) e (b) balança para pequenas massas (precisão de 0,01 g) 33

Figura 3.4: Betoneira utilizada para a mistura. 34

Figura 3.6: Ensaio de espalhamento.	35
Figura 3.7: Moldagem do corpo de prova e adensamento	36
Figura 3.8: Corpo de prova embalado com filme plástico e fita adesiva	37
Figura 3.9: Equipamento utilizado no ensaio de propagação do pulso eletrônico, com corpo de prova acoplado.	37
Figura 3.10: Esquema ensaio de determinação do Tempo Zero ( $t_0$ ) pelo método do pulso ultrassônico (SILVA et al., 2011a)	38
Figura 4.1: Curvas de velocidade da onda ultrassônica em função do tempo para os microconcretos analisados.	40
Figura 4.2: Curvas de velocidade da onda ultrassônica nas primeiras 10 horas de idade.	40
Figura 4.3: Curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços contendo apenas PSA e do traço referência.	42
Figura 4.4: Curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços contendo apenas nanossílica e do traço referência.	43
Figura 4.5: Curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços referência e dos contendo adição combinada de nanossílica e de PSA.	45
Figura 4.6: Curvas de velocidade da onda ultrassônica nas primeiras 10 horas de ensaio dos traços referência e dos contendo adição combinada de nanossílica (1%) e de PSA (0,2% e 0,3%).	46
Figura 4.7: Curvas de velocidade da onda ultrassônica nas primeiras 10 horas de ensaio dos traços referência e dos contendo adição combinada de nanossílica (2%) e de PSA (0,2% e 0,3%).	46



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resistência do concreto de referência contendo diferentes teores de PSA (adaptado PIÉRARD <i>et al.</i> , 2006)	17
Tabela 2.2: Resistência à compressão do concreto de referência contendo diferentes teores de PSA (modificado CRAEYE e DE SCHUTTER, 2006)	18
Tabela 2.3: Resultados do tempo zero para os microconcretos de relação $a/c = 0,3$ e diferentes teores de PSA, com os respectivos teores de superplastificantes (MORAES e CERQUEIRA (2014)	19
Tabela 3.1: Nomenclatura e descrição dos microconcretos fabricados neste programa e já desenvolvidos anteriormente por MANZANO (2014) e que serão utilizados como referência para comparação.	26
Tabela 3.2: Caracterização química do cimento.	27
Tabela 3.3: Propriedades determinadas por ensaios no laboratório de Furnas para o cimento utilizado.	27
Tabela 3.4: Caracterização da sílica ativa.	29
Tabela 3.5: Características físico-químicas do Superplastificante Glenium® 51	30
Tabela 3.6: Características do PSA estudado (MANZANO, 2014).	30
Tabela 3.7: Características físicas e químicas da NS utilizada (AKZONOBEL, 2013).	31
Tabela 3.8: Composição do microconcreto de referência (RILEM, 2012).	31
Tabela 3.9: Composição dos microconcretos	33
Tabela 3.10: Roteiro de mistura dos microconcretos.	34
Tabela 3.11: Frequência natural do transdutor de acordo com as dimensões da peça a ser ensaiada (RILEM NDT 1, 1972 apud SILVA, 2007).	36
Tabela 4.1: Tempo zero das misturas estudadas.	41

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

a/c	Relação entre água e cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARR	Aditivo Redutor de Retração
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAR	Concreto de Alta Resistência
CP V – ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DTU	Universidade Técnica da Dinamarca
LEM/UnB	Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília
MPa	Mega Pascal (10 <sup>6</sup> Pa)
NBR	Norma Brasileira Registrada
NS	Nanossílica
PA	Poliacrilamida
PAS	Poliacrilato de Sódio
PF-II	Projeto Final II
PSA	Polímero Superabsorvente
RA	Retração Autógena
REF	Referência
SANEAGO	Saneamento de Goiás S.A.
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silício
SSS	Saturado Superficialmente Seco
T <sub>A</sub>	Tempo transcorrido da adição de água ao início das medições
t <sub>0</sub>	Tempo Zero
UnB	Universidade de Brasília
UR	Umidade Relativa

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ABRANGÊNCIA E IMPORTÂNCIA

A fim de se sanar dificuldades em projetos, a engenharia busca novos materiais que se comportem de maneira mais adequada em determinadas situações. Nesse contexto, surge o concreto de alta resistência (CAR) por volta da década de 80, com o intuito de resistir a maiores solicitações e ainda permitindo a redução das seções dos elementos estruturais. A nova norma ABNT NBR 6118:2014, válida a partir de 29 de maio de 2014, já contempla tal tecnologia, apresentando especificações para concretos de até 90 MPa.

Essa alta resistência é adquirida a partir de uma baixa relação entre água e cimento (a/c) e um elevado consumo de material cimentício. Entretanto, o uso restrito de água levaria a perda da trabalhabilidade. A fim de se contornar essa adversidade, adiciona-se aos concretos de alta resistência aditivo superplastificante. Ademais, esse tipo de concreto, pela sua microestrutura densa e refinada, apresenta maior retração autógena (RA) que pode causar fissuração considerável e, devido a isso, foram feitos diversos estudos de estratégias para se mitigar esse tipo de retração.

Dentre esses estudos, o uso da cura interna por meio de polímero superabsorvente (PSA) apresentou resultados satisfatórios em reduzir a RA como se pode verificar nos trabalhos de KUMM (2009), PEREIRA e MATOS (2011), CLARO e SARAIVA (2012), ORDÓÑEZ (2013), TRALDI e AGUIRRE (2013), MORAES E CERQUEIRA (2014), MANZANO (2014) E SANTOS (2016). Em contrapartida, concretos com adição desse tipo de polímero apresentaram prejuízos em algumas propriedades mecânicas, como a redução da resistência à compressão.

A linha de pesquisa, a qual este trabalho pertence, busca compensar tal perda de resistência. Na busca de uma tentativa de solução optou-se pelo uso da nanossílica (NS) que já teve sua eficácia comprovada no aumento da resistência do concreto, conforme verificado por GLEIZE (2011); ZHANG, ISLAM e PEETHAMPARAN (2012); HOU (2013); SANTOS (2016), dentre outros.

Com o propósito de se analisar o efeito dessas adições na retração autógena faz-se necessário que se conheça o tempo zero, intervalo de tempo entre o a adição de água ao cimento e a formação do patamar de percolação (idade em que ocorre a transição do estado de suspensão para o estado sólido), haja vista que a retração apenas provoca fissuração após essa

transição. Para isso, dispõe-se da metodologia do pulso ultrassônico proposta por SILVA (2007).

Tais informações descritas anteriormente demonstram a importância da linha de pesquisa de concreto de alta resistência desenvolvida na Universidade de Brasília (UnB), a qual busca soluções para que o concreto de alta resistência possa vir a ser utilizado em larga escala, em conformidade com a boa prática da engenharia de solucionar problemas.

Este trabalho vem então com o intuito de contribuir à linha de pesquisa, determinando o tempo zero para balizar o início da determinação experimental da retração autógena, determinação essa que foi realizada pela engenheira Thyala Anarelli Cunha e Santos em sua dissertação de mestrado. Assim, os resultados aqui obtidos fazem parte de uma pesquisa mais abrangente realizada na Universidade de Brasília com intuito de se sanar os problemas referentes ao concreto de alta resistência.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

Determinar o tempo zero de microconcretos contendo polímeros superabsorventes (PSA) e nanossílica (NS) pela metodologia do ultrassom para balizar o início da determinação experimental da retração autógena.

### **1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

Investigar a influência das adições de diferentes teores de PSA e NS (e combinação de ambos) no tempo zero do microconcretos de alta resistência.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR)**

Na década de 80, o surgimento do concreto de alta resistência criou uma grande revolução na tecnologia do concreto. Tal fenômeno foi possível devido ao advento dos chamados aditivos superplastificantes, capazes de produzir concretos com trabalhabilidade satisfatória, mesmo tendo uma relação a/c baixa, e da incorporação da sílica ativa, tornando a estrutura mais densa (CLARO e SARAIVA, 2012).

Segundo a ABNT NBR 8953:2015, existem duas classes para classificação do concreto de acordo com sua resistência característica à compressão: grupo I para concretos com resistência entre 10 MPa e 50 MPa e grupo II, entre 55 MPa e 90 MPa. Para METHA e MONTEIRO (2008), o concreto passa a ser classificado com de alta resistência, quando apresenta resistência característica à compressão a partir de 40 MPa, englobando, assim, todo o grupo II e parte do grupo I da norma referida.

O concreto de alta resistência pode ainda ser classificado quanto à dosagem. Para AÏTCIN (1998), os CARs são aqueles que apresentam uma relação entre água e cimento (a/c) inferior a 0,4. Sendo esse critério mais apropriado, devido ao fato da relação a/c ter uma relação inversa com a resistência do concreto, como se verifica através da Lei de Abrams.

Devido a essa baixa relação a/c, os CARs apresentam um refinamento do tamanho de seus poros. Isso, somado à adição de sílica ativa, comum nesse tipo de concreto, contribui para o avanço do mecanismo de autodessecação e, conseqüentemente, da retração autógena.

#### **2.1.1 RETRAÇÃO AUTÓGENA**

Segundo SILVA (2007), a retração autógena pode ser definida como uma redução macroscópica de volume observada nos sistemas cimentícios após atingido o patamar de percolação ( $t_0$ ), provocada pelo mecanismo da autodessecação, gerando tensões capilares nos poros parcialmente cheios de água. Esse tipo de retração não é muito relevante em concretos convencionais, entretanto, em CARs tal retração é mais significativa devido ao refinamento dos poros, como citado anteriormente.

A autodessecação ocorre quando a água deixa os poros capilares para servir de reagente na reação de hidratação do cimento (perda de umidade no interior dos poros). Com isso, ocorre uma interação entre a água remanescente no interior dos poros e o ar, induzindo a

formação de meniscos que geram tensões de tração consideráveis conforme é apresentado na Figura 2.1. Estas tensões não são devidamente suportadas por concretos nas idades iniciais, o que pode gerar microfissuração (PEREIRA e MATOS, 2011).

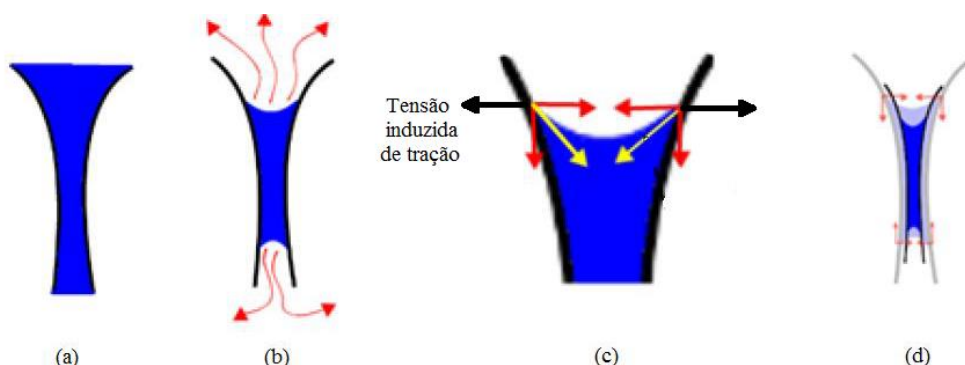


Figura 2.1: Representação do fenômeno da retração autógena no tubo capilar. (a) capilar completamente saturado com umidade relativa interna (UR) igual a 100 %; (b) capilar parcialmente saturado, mostrando a saída de água para a reação de hidratação e  $UR < 100\%$ ; (c) no detalhe: a região ar-água dentro do capilar e a representação das componentes da tensão superficial e consequente tensão induzida de tração; (d) representação da componente horizontal de tensão superficial, que faz encolher o poro, e da componente vertical, que faz encurtar o poro. (RÊGO E AKITAYA, 2010).

O mecanismo da variação da depressão capilar está intimamente ligado com a autodessecação. Como foi dito anteriormente, a autodessecação promove o contato entre superfícies de água e ar no interior dos poros. Na interface da superfície líquido-gás se estabelece um gradiente de pressão chamado de pressão capilar (depressão capilar) que é função da tensão superficial líquido-gás, do seu raio de curvatura e do ângulo de molhamento (SILVA, 2007).

Tal mecanismo é explicado pelas leis de Laplace e Kelvin. De acordo com essas leis, podemos obter importantes conclusões:

- Quanto mais estreitos forem os poros em processo de autodessecação, maior a intensidade da pressão capilar;
- Quanto menor a umidade relativa, menor a dimensão do poro não saturado (onde pode existir menisco) (SILVA, 2007).

A retração autógena, portanto, vista pelo mecanismo da depressão capilar acontece quando, em um capilar não saturado completamente, a fase líquida é tracionada devido à criação de um menisco na interface líquido-gás, o que induz uma pressão negativa nas paredes dos capilares, tendendo a aproximá-la. A resposta a essa compressão é a retração macroscópica observável, denominada retração autógena (SILVA, 2007). A Figura 2.1 ilustra a ocorrência do fenômeno.

Vale lembrar que a retração autógena é ocasionada pela hidratação do cimento Portland, sem qualquer influência externa. Não ocorre nem ganho nem perda de massa, não desenvolve gradiente de umidade ou temperatura e não é resultado de cargas externas.

As deformações autógenas podem ainda ser dividida em três fases de acordo com BALTHAR (2004):

- a. Contração inicial: ocorre de duas a três horas após a mistura e está relacionada ao início das reações de hidratação e ao que se denomina de contração de *Le Chatelier*, que é originada do fato do volume dos hidratos formados pelas reações ser menor do que o volume dos reagentes iniciais mais a água. Tal contração, todavia não causa prejuízos para a estrutura do concreto, pois o mesmo ainda não tem comportamento de sólido e, logo, não produz fissuras;
- b. Período de expansão: ocorre entre quatro e dez horas após a mistura do cimento com água e pode ser prolongada até vinte horas. Está relacionado à formação de grandes cristais de etringita durante a pega e também ao fato das reações exotérmicas existentes provocarem dilatação térmica considerável;
- c. Retração por autodessecação: que tem início a partir do tempo zero e termina somente quando todo processo de hidratação do cimento é concluído. É responsável pelo maior percentual da retração autógena, ocorre quando o processo de hidratação do cimento succiona a água adsorvida para a hidratação, provocando uma tensão capilar no interior dos poros que gera a aproximação das partículas de cimento hidratado.

Os mecanismos de expansão e retração atuam simultaneamente durante a hidratação. Por simplificação, supõe-se uma superposição linear da retração e da expansão, mas o que geralmente ocorre é uma interação de mecanismos. A deformação medida é causada geralmente por várias forças de origens diferentes interagindo no curso da hidratação. O que acontece é que, a partir de um determinado tempo, as deformações de retração compensam as de expansão e as determinações realizadas experimentalmente (macroscopicamente) se traduzem apenas por retração (SILVA, 2007).

Vale ressaltar neste ponto a diferença entre contração e retração. A primeira está relacionada à variação volumétrica do sistema enquanto o mesmo está no estado fluido. Por sua vez, a retração se refere a um material cimentício no estado endurecido, com comportamento rígido suficiente para se opor às retrações volumétricas. A contração de Le

Chatelier, portanto, não deve ser contabilizada para a determinação da retração autógena, sendo importante diferenciar o momento em que o fenômeno para de agir (PEREIRA e MATOS, 2011).

### 2.1.2 TEMPO ZERO

Segundo NEVILLE (1997), pega se refere à mudança de estado fluido para um estado sólido, empregado para designar o enrijecimento da pasta de cimento. Enrijecimento é a perda de consistência da pasta plástica de cimento. O início de pega marca o tempo em que a pasta se torna não trabalhável, por consequência, o lançamento, a compactação e o acabamento do concreto, após este estágio, se tornam difíceis. A pasta não se solidifica repentinamente, necessita de um tempo considerável para se tornar totalmente rígida. O tempo necessário para solidificar completamente marca o tempo de fim de pega, que não deve ser longo para permitir, o quanto antes, a retomada das atividades construtivas, após o lançamento do concreto. Já o termo endurecimento se refere ao ganho de resistência com o tempo, após a pega.

Embora os termos pega e endurecimento sejam úteis para a prática do concreto, não fornecem uma definição precisa da idade na qual as tensões podem ser transferidas nos elementos de concreto, fundamental para o caso da retração autógena.

Tempo zero ( $t_0$ ) é o instante no qual as tensões passam a ser suportadas pelo esqueleto rígido formado no concreto, caracterizando a transição suspensão-sólido (WEISS, 2002). Alguns autores definem este instante como “patamar de percolação” (ACKER, 1988 *apud* SILVA, 2007). O tempo zero é a duração entre o instante em que a água entra em contato com o cimento até o momento no qual a mistura desenvolve uma estrutura suficientemente rígida para se opor ao movimento e permitir transferência de tensões de tração através do concreto (SILVA, 2007).

De acordo com ACKER (1988), *apud* SILVA (2007), os grãos sólidos de cimento, anteriormente isolados na fase suspensão, começam a ter contato entre si à medida que os produtos de hidratação vão sendo formados em torno desses grãos. Esses contatos são aleatórios, descontínuos no volume e vão formando subconjuntos sólidos ligados continuamente, denominados *amas*. O momento em que primeiro caminho que atravessa o conjunto do material é estabelecido constitui o tempo de formação do patamar de percolação, o que significa que o concreto passa a receber tensões. A Figura 2.2 ilustra o fenômeno.



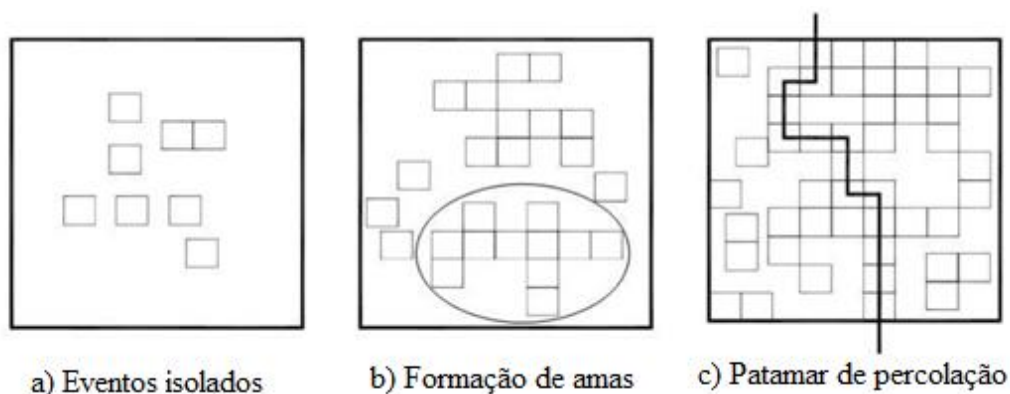


Figura 2.2: Esquema do conceito de patamar de percolação (ACKER, 1988 adaptado por SILVA, 2007).

Este trabalho partirá da ideia de se utilizar o conceito de “tempo zero” (que também pode ser chamado, simplesmente, de  $t_0$ ) para se iniciar as determinações de retração autógena. No entanto, muitos órgãos normalizadores estão vagarosos no processo de padronização do procedimento experimental para determinar esse tempo inicial para se medir a retração autógena. Desse modo, tal decisão torna-se responsabilidade do pesquisador ou do consultor de engenharia. A falta de padronização com aceitação geral dificulta a comparação direta entre diferentes materiais cimentícios e prejudica a comparação dos modelos teóricos, disponíveis na literatura técnica.

Foram indicadas nesse item algumas definições a respeito de tempo zero e de patamar de percolação. Nota-se que diferentes autores possuem a sua própria definição desses termos. Para evitar dificuldade da compreensão do texto, utilizou-se o termo “tempo zero” para se referir ao intervalo de tempo transcorrido entre a adição de água ao cimento e a formação do patamar de percolação (idade em que ocorre a transição do estado de suspensão para o estado sólido).

#### 2.1.2.1 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA TRANSIÇÃO SUSPENSÃO-SÓLIDO

É notável a existência de diferentes pontos de vista acerca da definição de tempo zero, o que cria dificuldade quando comparados resultados de pesquisas distintas. Alguns teóricos manifestam a necessidade de determinação do tempo de formação do patamar de percolação e seu emprego para que seja possível a determinação das deformações que ocorrem pela retração autógena (TRALDI e AGUIRRE, 2013).

Com o avanço tecnológico nos dias atuais, muitos métodos permitem monitorar, de forma relativamente fácil, o tempo zero e os tempos de início e fim e pega de pastas de

cimento, seja na própria pasta, na argamassa ou no concreto (LOPES, 2011). Dentre os métodos existentes, os mais utilizados são:

- Método do aparelho de Vicat;
- Método do impacto-eco;
- Método da condutividade elétrica;
- Método calorimétrico;
- Método da onda ultrassônica.

Mesmo que seja explorada a ideia de utilizar os tempos de início ou fim de pega para que se possa determinar a transição suspensão-sólido, estes não se configuram como mais indicados para a medição de deformação. Tal fato é notável, pois este instante não demonstra o momento exato das tensões de tração induzidas pela autodessecação no concreto. O uso do aparelho de Vicat, para a determinação do tempo de pega, é, de certa forma, bastante arbitrário em tecnicidade e dependente das habilidades do operador. Atualmente, existem métodos mais modernos e mais precisos para determinar a pega, e neste trabalho será utilizado a técnica do ultrassom.

Apesar de não ser normalizada, a técnica da propagação da onda ultrassônica é cada vez mais usada para a determinação do tempo transicional entre estado fluido e sólido, esta técnica pode ser utilizada para determinação do tempo de pega e endurecimento da argamassa através da mudança brusca da velocidade de passagem das ondas pelo material cimentício.

Tal procedimento, segundo SILVA (2007), consiste da criação de um molde retangular, de forma que suas extremidades sejam acopladas por dois transmissores (um transmissor e outro receptor) a uma máquina de ultrassom própria para experimentos em material cimentício. As ondas com frequência constante, em sua propagação, são transmitidas através do sistema de uma ponta a outra do molde. O eletrodo receptor recebe, então, estas ondas e calcula a velocidade de propagação das mesmas, em função do tempo de transmissão e do comprimento do molde. Com esses dados, traça-se a curva de velocidade de propagação *versus* idade do concreto e, a partir dessa, determina-se o tempo de formação do patamar de percolação, o qual é usado para a definição do tempo zero.

As curvas de velocidade e tempo geram a possibilidade da distinção entre as fases do sistema. O período de dormência é demonstrado nos valores baixos da velocidade (até mesmo constantes), caracterizando a primeira fase. A velocidade então aumenta de maneira periódica e rápida no início do segundo estágio para depois aumentar mais gradualmente, já na terceira fase.

No fim (fase 4), alcança um valor assintótico. O tempo de transição entre o estado fluidos e sólido é avaliado do momento em que se adiciona a água ao concreto até o momento em que ocorrerá um aumento brusco da velocidade. Isto é, de maneira simples, a criação do esqueleto do concreto estudado, funcionando como passagem entre os extremos do corpo de prova (TRALDI e AGUIRRE, 2013).

A técnica da propagação da onda ultrassônica foi utilizada por SILVA (2007) para a determinação do tempo zero, obtendo resultados satisfatórios. Seu trabalho serviu de referência para pesquisas seguintes, como PEREIRA e MATOS (2011), CLARO e SARAIVA (2012), ORDÓÑEZ (2013), TRALDI e AGUIRRE (2013) e MORAES e CERQUEIRA (2014).

### **2.1.3 ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA**

Visto que a retração autógena é um dos principais problemas do concreto de alta resistência, várias estratégias para sua mitigação vêm sendo estudadas. BENTZ e JENSEN (2004) mencionam algumas dessas estratégias:

- Adição de aditivo redutor de retração (ARR), que atua reduzindo a tensão superficial da água, reduzindo assim a tensão no capilar;
- Controle da distribuição do tamanho das partículas do cimento;
- Modificação da composição mineralógica do cimento;
- Cura interna através da adição de agregados leves saturados
- Adição de fibras (poliméricas, metálicas ou de carbono) para restringir mecanicamente o material evitando, assim, o surgimento de fissuras;
- Cura interna por meio do uso de polímero superabsorventes.

Segundo JENSEN e HANSEN (2001) o procedimento de “cura interna” é o mais recomendado para combater possíveis fissurações provenientes da retração autógena em CARs. A proposta deste método é incorporar, durante a mistura, algum mecanismo que seja capaz de atuar como reservatórios de água, liberando-a na medida em que a umidade relativa do meio decresce (TAZAWA e MIYAZAWA, 1999). Esta água de cura interna, de acordo com CUSSON e HOOGEVEEN (2008), é naturalmente levada dos poros, relativamente largos do agente de cura saturado, para os poros menores da pasta de cimento.

Para um desempenho ótimo, o agente de cura interna tem que possuir alta capacidade de absorção de água e elevada taxa de liberação dessa água (JENSEN e LURA, 2006).

Partículas retentoras de água como agregados leves e polímeros superabsorventes são considerados materiais promissores para agirem como fontes internas de água (IGARASHI e WATANABE, 2006).

Neste trabalho, será abordada somente a estratégia do uso da cura interna com polímeros superabsorventes – PSA – para a mitigação da retração autógena, por se tratar de uma solução mais moderna para tal problema.

## 2.2 POLÍMEROS SUPERABSORVENTES (PSAs)

Polímeros superabsorventes são materiais poliméricos capazes de absorver um alto volume de líquido do meio e retê-lo em sua estrutura sem dissolver (JENSEN, 2001). Durante a mistura do concreto, partículas de PSA absorvem uma grande quantidade de água e formam macro-inclusões contendo água livre. Esta água livre é consumida durante a hidratação do cimento, à medida que a umidade relativa do concreto reduz ( $UR < 100\%$ ), promovendo a cura interna (PIÉRARD *et al.*, 2006).

Esses superabsorventes podem absorver líquidos em uma quantidade muito maior que o seu próprio peso. Como indicado na Figura 2.3, no estado seco, os PSAs apresentam aparência granular e branca, e no estado hidratado, encontram-se como um gel transparente (MORAES e CERQUEIRA, 2014).



Figura 2.3: Polímero superabsorvente seco e hidratado (TRAMFLOC, 2014).

Ademais, NASSER *et al.* (2007) define os PSAs como “compostos hidrofílicos capazes de absorver e reter em sua estrutura grande quantidade de água e de permanecer insolúveis. Sua insolubilidade é garantida por sua estrutura em rede tridimensional, sustentada por ligações cruzadas intermoleculares”.

Estes polímeros, ainda hoje, são utilizados com maior frequência na fabricação de produtos de higiene pessoal. Mas existem também aplicações como: recuperação de solos; atenuação do impacto da seca; incrementação em solos aráveis, proporcionando melhores condições de germinação; combate a incêndios; entre outros (TRALDI e AGUIRRE, 2013).

Os PSAs têm como vantagem o fato de poderem ser inicialmente projetados para propósitos especiais de cura interna, escolhendo-se o tamanho e o formato das partículas, a capacidade de absorção de água e outras propriedades (MECHTCHERINE *et al.*, 2009).

Assim, esses polímeros pertencem ao grupo dos chamados “materiais inteligentes” – materiais que, de uma maneira controlada, mudam significativamente suas propriedades devido a estímulos externos (JENSEN, 2008).

Tais polímeros se mostram ainda bem mais adequados do que os agregados leves, tendo em vista que podem ser adicionados na forma seca durante a mistura e, contrariamente ao agregado leve, o uso do PSA permite adequá-lo da melhor maneira possível às características do concreto (JENSEN, 2001). Os polímeros permitem determinar previamente o formato e a distribuição dos tamanhos dos poros que serão deixados após a desidratação.

É importante salientar que a adição de componentes à mistura pode levar a alterações nas suas propriedades, tanto no estado fluido, quanto no estado endurecido do concreto. Com isso, torna-se indispensável o estudo das consequências dessa adição, as quais são discutidas no item 2.2.2.

### **2.2.1 MECANISMO DO PSA**

A cura interna com o uso de PSA ocorre de maneira efetiva devido à rápida absorção de água pelo polímero que depois a libera de forma gradual com a redução da umidade interna do concreto. FRIEDRICH (2012) discorre que a força motriz para o inchamento dos PSAs é a pressão osmótica, que é inversamente proporcional a concentração de íons na solução aquosa.

Quanto à sua composição química, os PSAs são uma estrutura interligada e iônica, formada por poliacrilatos ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados (JENSEN e HANSEN, 2001). Os polímeros superabsorventes mais utilizados são a Poliacrilamida (PA) e o Poliacrilato de Sódio (PAS) (Figura 2.4) que absorvem água por meio da formação de pontes de hidrogênio e por osmose, respetivamente (MARCONATO e FRANCHETTI, 2002).

Os PSAs podem ser produzidos por solução ou suspensão polimerizada. Por conta da sua natureza iônica e da sua estrutura interconectada, podem absorver uma grande quantidade de água sem dissolver. Do ponto de vista químico, toda a água no interior do PSA pode ser considerada como água livre (JENSEN e HANSEN, 2001).

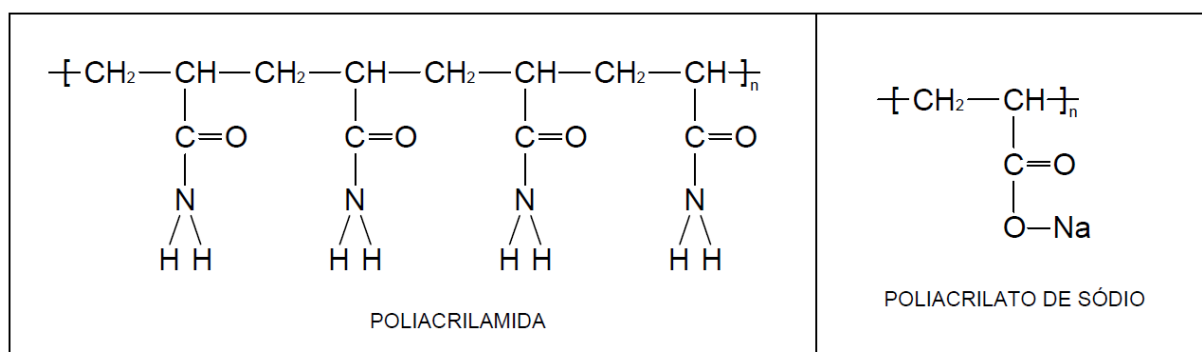


Figura 2.4: Estrutura da poliacrilamida e do poliacrilato de Sódio, onde “H”, “C”, “O”, “N” e “Na” representam átomos de Hidrogênio, Carbono, Oxigênio, Nitrogênio e Sódio, respectivamente.

As partículas de PSA existem em dois estados, colapsados e inchados. A transição de fase é um resultado de um balanço entre forças que tendem a expandir a rede de polímeros e forças que tendem a retrai-la. Muitos mecanismos estão envolvidos nesse processo. Em suma, a transição é resultado de um balanço das forças repulsivas que atuam expandindo a rede polimérica, e forças atrativas que agem encolhendo a rede. O interior do PSA possui uma alta concentração de íons, que induzem a entrada da água para seu interior por osmose. Outro fator contribuinte para o inchamento é a solução de grupos hidrofílicos na água, presentes ao longo de toda a cadeia polimérica. Ao mesmo tempo, a energia elástica das moléculas se opõe ao inchamento (JENSEN e HANSEN, 2001).

A salinidade da solução aquosa tem uma importância especial para os PSAs, já que quando a concentração de íons fora do polímero aumenta a pressão osmótica dentro do gel diminui, reduzindo a capacidade de absorção (JENSEN e HANSEN, 2001).

Propriedades importantes do PSA incluem resistência, módulo de elasticidade do gel inchado e capacidade de absorção. Todas essas propriedades dependem da densidade das ligações cruzadas da rede, o módulo de elasticidade aumenta e a capacidade de absorção diminui com o aumento da densidade das ligações cruzadas (JENSEN e HANSEN, 2001).

A água no PSA está presa por ligações extremamente fracas - a maior parte dela está em equilíbrio com cerca de 100% de UR. À medida que a UR do material cimentício cai significativamente abaixo dos 100% de UR, a água se moverá, passará do PSA para o

material cimentício e manterá a UR próxima a 100%. Logo, restringe a autodessecação do concreto (PEREIRA e MATOS, 2011).

JENSEN e LURA (2006) afirmam que a água tem que estar livremente acessível à hidratação do cimento, o que significa que ela tem que estar termodinamicamente e cineticamente acessível para as reações cimentícias. Termodinamicamente acessível significa que o meio tem de estar em equilíbrio com a umidade relativa próximo aos 100%. Cineticamente acessível se refere a água proveniente do PSA alcançar todas as partes do material cimentício. Isto quer dizer, primeiro, que a água não pode estar confinada e sim ser prontamente liberada, assim que a umidade relativa da pasta de cimento diminui. Segundo, que a água para cura interna tem de estar bem distribuída espacialmente.

## **2.2.2 EFEITOS DO PSA NO MICROCONCRETO**

A adição de polímero superabsorvente ao microconcreto pode levar a alterações nas propriedades deste, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Com isso, torna-se indispensável o estudo das consequências dessa adição. As principais consequências do uso do PSA são observadas no que diz respeito à porosidade, retração autógena, resistência mecânica e tempo zero.

A adição de PSA ao concreto leva a um aumento na porosidade total, enquanto o volume de poros capilares aumenta proporcionalmente em comparação ao aumento do volume de poros de gel. Os poros vazios, gerados pela autosssecagem numa pasta de cimento sem inclusão de PSA, são irregulares e parcialmente conectados; ao contrário, os poros vazios gerados em uma pasta modificada pela inclusão de partículas de PSA serão, em sua maioria, esféricos desconectados e de forma definida (CAMPOS, 2009).

Já a influência do polímero na retração autógena, nas propriedades mecânicas e no tempo zero serão discutidas, mais detalhadamente, nos tópicos a seguir.

### **2.2.2.1 EFEITO NA RETRAÇÃO AUTÓGENA**

Quanto ao efeito do polímero superabsorvente na retração autógena, várias pesquisas foram feitas variando-se a dosagem do polímero na mistura e a forma de determinação da retração.

TRALDI e AGUIRRE (2013) estudaram a deformação autógena utilizando o mesmo polímero utilizado nesta pesquisa e as prescrições da RILEM TC 225 – PSA Round Robin Test em misturas de relação a/c = 0,30 para teores de 0,3% e 0,6% de PSA, além do traço de

referência. Observaram, assim, que a adição do polímero reduziu drasticamente a deformação autógena em relação ao traço de referência, sendo essa redução da ordem de 80% para o traço com 0,3% de PSA e de 90% para 0,6% de PSA, aos 28 dias. Os resultados são apresentados na Figura 2.5:

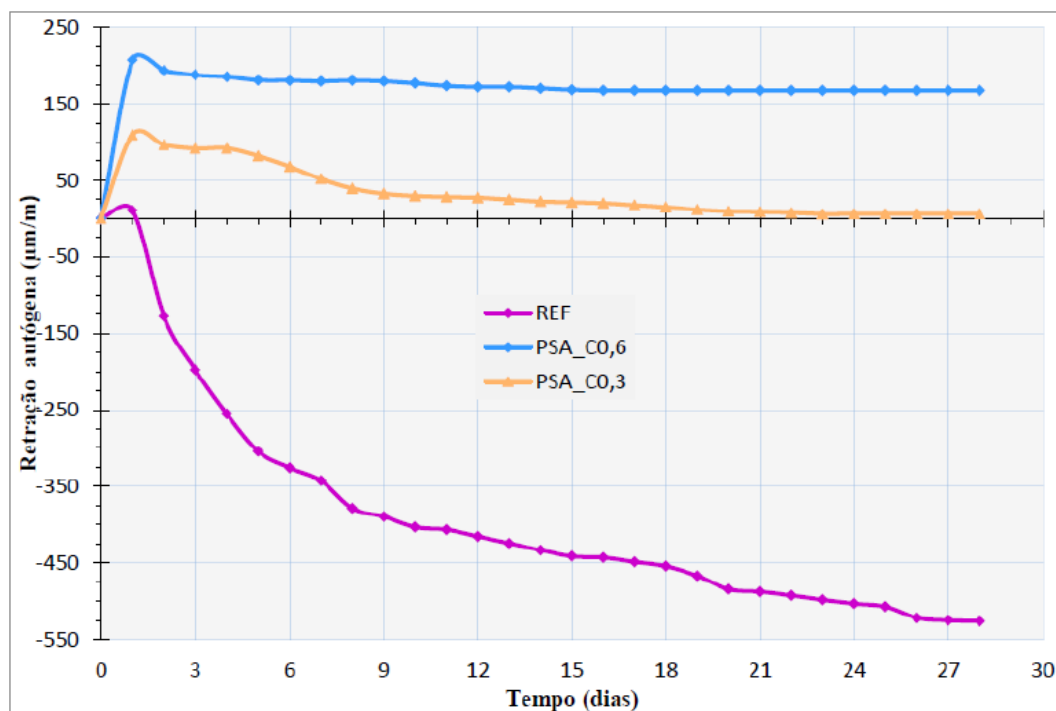


Figura 2.5: Retração autógena dos três traços: referência, PSA 0,3% e PSA 0,6% (TRALDI E AGUIRRE, 2013).

Um fator fundamental para a eficiência do PSA na mitigação da retração autógena é o tamanho de suas partículas. Conforme ORDÓÑEZ (2013), partículas muito grandes não são capazes de se espalhar uniformemente pela pasta e podem, assim, não conseguir absorver a quantidade suficiente de água durante a mistura, reduzindo a sua eficiência. Por outro lado, as partículas muito pequenas podem ter seu efeito reduzido devido ao preenchimento da pasta com os produtos da hidratação ou, ainda, podem apresentar uma zona de superfície menos ativa se comparada ao volume. Logo, o PSA apresenta maior eficiência na retração autógena quando se utiliza um tamanho ótimo, que LURA *et al.* (2006) sugerem ser de 100  $\mu\text{m}$  no estado inchado. O tamanho das partículas do polímero também afeta o desempenho do concreto, influenciando na estabilidade mecânica durante a mistura e nas propriedades reológicas do concreto fresco.

PIÉRARD *et al.* (2006) também observaram a retração total de misturas contendo 0,3% e 0,6% de adição de PSA, além da referência. As amostras apresentaram uma retração total (retração autógena, térmica e por secagem) muito parecida. Segundo os autores,



enquanto a retração autógena com o uso do PSA é pelo menos 50% menor do que a no concreto de referência, a retração por secagem com a cura interna aparenta ser maior.

Estudos de retração autógena feitos por CRAEYE *et al.* (2011) *apud* ORDÓÑEZ (2013) medidos por meio do dilatômetro vertical levam a conclusão que a adição do PSA conduz a uma redução na retração autógena. As leituras foram iniciadas uma vez atingido o tempo zero (6 horas depois da moldagem). Nesses estudos, é apresentada expansão nas primeiras horas como o obtido em diferentes trabalhos. Para CRAEYE *et al.* (2011) *apud* ORDÓÑEZ (2013), esta expansão é apresentada nas composições com maior quantidade de PSA, possivelmente devido à liberação prematura de água para cura interna num momento de autosecagem.

SOLIMAN e NEHDI (2013) estudaram também a eficiência do PSA como agente mitigador da retração autógena em concretos de ultra-alto desempenho. Os autores trabalharam com uma adição de 0,6% por massa de cimento de PSA e com uma quantidade de água para cura interna igual a 18% a mais da relação a/c com base no modelo de Powers. A retração autógena foi testada com a metodologia desenvolvida por Jensen e Hansen utilizando o dilatômetro. A adição de 0,6% de PSA reduziu em 22% a retração autógena comparada com o concreto de referência.

Em seus estudos desenvolvidos seguindo a linha de pesquisa na Universidade de Brasília a qual este projeto faz parte, PEREIRA e MATOS (2011) experimentaram a mitigação da retração autógena utilizando dois PSAs diferentes com a concentração de 0,3% em relação à massa de cimento. O tempo zero foi determinado pelo método do ultrassom e os ensaios se mostraram eficazes, com ligeira vantagem para um dos PSAs utilizados. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.6.

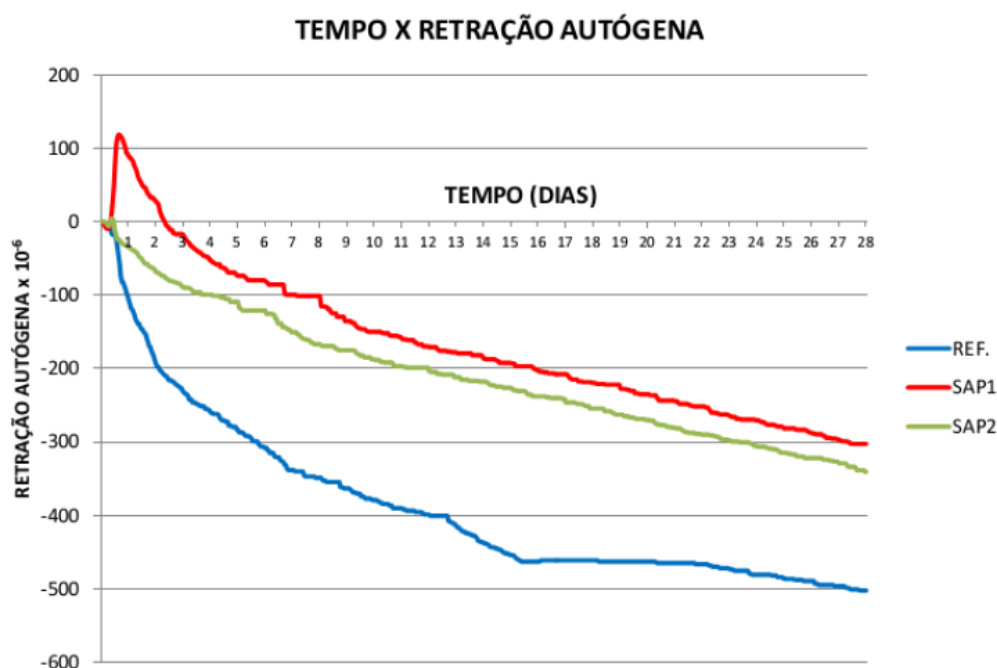


Figura 2.6: Resultados médios de retração autóloga encontrados para PSA1, PSA2 e traço referência (PEREIRA e MATOS, 2011)

Resultados semelhantes, comprovando a eficácia do uso do polímero superabsorvente (PSA) na mitigação da retração autóloga também podem ser encontrados nos estudos feitos por: IGARASHI e WATANABE (2006), MECHTCHERINE (2009), CRAEYE e DE SCHUTTER (2006) e LURA (2006).

#### 2.2.2.2 EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A resistência à compressão em concretos e argamassas com adição de PSA é o ponto mais polêmico da técnica, pois como apresentado a seguir, alguns autores encontraram grandes disparidades, com resistências menores no uso do PSA, e outros não determinaram diferenças significativas.

MECHTCHERINE *et al.* (2009) mediram a resistência a compressão em cubos de 150 mm de lado e em pequenas vigas de seção transversal 40 mm por 40 mm, com amostras secas em clima regular de laboratório e encontraram resistências à compressão em média 10% a 20% menores que as amostras sem uso do PSA.

Em relação à resistência à compressão é sabido que o uso de partículas superabsorventes na mistura cria, em longo prazo, uma série de vazios no concreto, devido à redução do volume das mesmas (que antes estavam inchadas e, com a perda de água, voltam ao tamanho natural), sendo assim, é natural que haja uma perda na resistência final. A questão a se analisar é saber até que ponto tal perda é admissível.

MONNIG (2005) determinou que o desenvolvimento da resistência a compressão de argamassas misturadas com diferentes relações água-cimento e diferentes tipos de polímeros não apresentou diferenças significativas em relação a misturas sem uso de PSA. Isso demonstra que se trata de um assunto controverso, devido ao fato das alterações o concreto dependerem do tipo de polímero utilizado.

DUDZIAK e MECHTCHERINE (2008) determinaram a resistência à compressão da mesma forma que MECHTCHERINE (2006), mas em duas diferentes condições de secagem, não selada no clima do laboratório e alternativamente, selada e guardadas a temperatura constante de 20°C. Não foram encontrados efeitos negativos pronunciados na resistência a compressão ou na resistência a flexão.

JENSEN e HANSEN (2001) afirmam que uma pasta de cimento com cura interna e relação a/c igual a 0,30 e mais 0,05 de água proveniente de PSA possui as mesmas características em termo de porosidade e “grau de hidratação” de uma pasta com a/c igual a 0,35 onde não houve uso de PSA para cura interna, já que a água absorvida pelo PSA é considerada livre e, portanto, deve ser levada em conta na relação a/c final.

Todavia, eles afirmam que a distribuição dos poros destas duas pastas se diferencia drasticamente, uma vez que a primeira mistura contém inclusões de macroporos geometricamente desenhados ao invés de minúsculos poros irregulares e aleatoriamente distribuídos. Segundo os autores então, por um lado, a inclusão de PSA aumenta a resistência, pois torna a mistura mais regular e favorece a hidratação; porém por outro lado os macroporos gerados após a cura reduzem a resistência do concreto.

Através do modelo de Powers, tais pesquisadores concluíram que juntando estes dois fatores é possível prever que a capacidade resistente da pasta com a/c igual a 0,3 é comparável a resistência de uma pasta com cura interna de 0,05, totalizando uma relação a/c de 0,35.

A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 exemplificam tal redução na resistência à compressão do concreto.

Tabela 2.1: Resistência do concreto de referência contendo diferentes teores de PSA (adaptado PIÉRARD *et al.*, 2006)

Mistura	PSA (%)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Reduções na resistência (%)
REF.	0	108	-
PSA_0,3	0,3	99	8
PSA_0,6	0,6	93	14

Tabela 2.2: Resistência à compressão do concreto de referência contendo diferentes teores de PSA (modificado CRAEYE e DE SCHUTTER, 2006)

Mistura	PSA (%)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Reduções na resistência (%)
REF.	0	108,7	-
PSA_0,3	0,3	91,3	16
PSA_0,4	0,4	79,8	27
PSA_0,5	0,5	75,0	31

É de se notar que o PSA provoca uma redução na resistência à compressão nos objetos de estudo. Sua influência na resistência à tração não é amplamente analisada, sendo lembrada por poucos trabalhos, tais quais o desenvolvido por MECHTCHERINE *et al.* (2009) e pelo mais recente estudo de CRAEYE *et al.* (2011). Isso demonstra a importância do estudo da adição de nanossílica combinada com PSA haja vista que se espera que a primeira adição combata o prejuízo na resistência provocado pela última. Esses estudos também são importantes para uma melhor análise do uso desse tipo de polímero e, dessa forma, definir-se até que teor essa adição é benéfica para o concreto.

### 2.2.2.3 EFEITO NO TEMPO ZERO

Dentro da linha de pesquisa da qual este trabalho pertence, já foram realizadas algumas pesquisas que investigaram a influência da adição do PSA no tempo zero dos microconcretos de alta resistência.

Uma dessas pesquisas foi a de PEREIRA e MATOS (2011), na qual dois tipos de polímeros foram utilizados. O tempo zero foi obtido através do método do ultrassom e comparado com o tempo de início de pega obtido através do aparelho de Vicat. O tempo zero foi diferente com o uso de PSA, sendo o PSA 1 o que mais o retardou (45 minutos). O PSA 2 conferiu um aumento de 30 minutos para a determinação do  $t_0$ . Comparativamente, o tempo de pega apresentado pelo aparelho de Vicat foi alterado de 4 a 5 horas. Essa diferença deve ser levada em consideração nos estudos experimentais e para balizar modelos numéricos.

Já a pesquisa de ORDÓÑEZ (2013), que embora tenha utilizado um polímero diferente do utilizado nesta pesquisa, também mostrou que o tempo zero determinado por onda ultrassônica é retardado na presença de PSA, onde o teor de 0,3% causou um retardo de 70 minutos, enquanto a adição nos teores de 0,4% e 0,6% retardou em 90 minutos. Tal pesquisadora afirma que o atraso na determinação do tempo zero na presença de PSA, possivelmente deve-se a um aumento das partículas floculadas de cimento e ao fato da adição

da quantidade de água para cura interna, provocando o afastamento das partículas de cimento umas das outras.

TRALDI e AGUIRRE (2014) utilizaram o aparelho de ultrassom como instrumento para a determinação do tempo zero ( $t_0$ ), seus resultados apresentam um atraso na ordem de 8 horas na mistura com teor de PSA de 0,3% em relação a massa de cimento e de 10 horas na mistura com teor de 0,6% para o tempo zero em relação a mistura de referência ( $a/c = 0,3$ ). Acredita-se que isso se deve a superdosagem de superplastificante nessas misturas. O gráfico apresentado na Figura 2.7 ilustra o atraso no  $t_0$ .

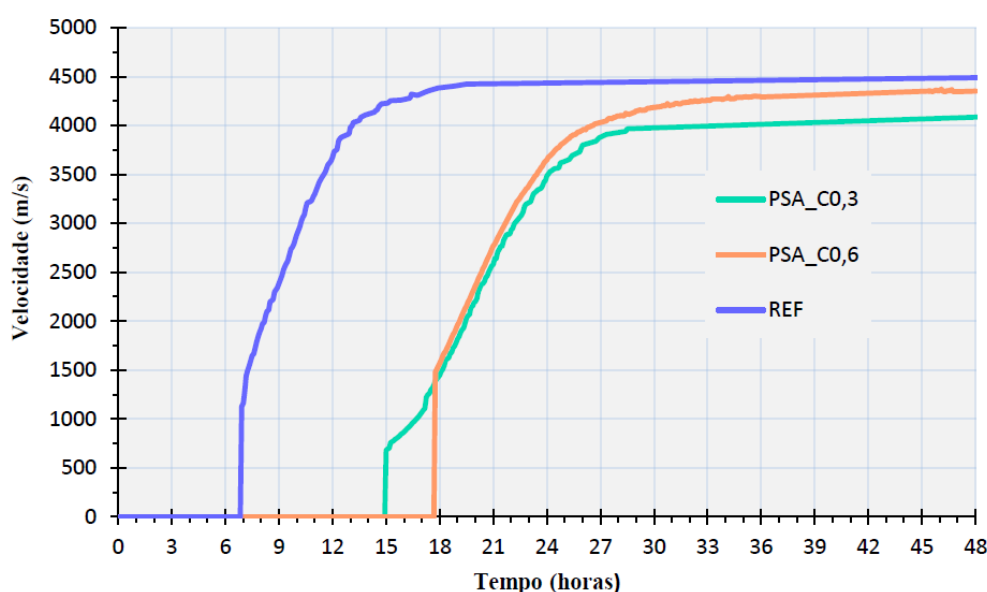


Figura 2.7: Curvas de velocidade da onda ultrassônica em função do tempo para os microconcretos de referência, com 0,3% de PSA tipo C e 0,6% de PSA tipo C (TRALDI e AGUIRRE, 2014)

MORAES e CERQUEIRA (2014) verificaram ainda, que ao comparar-se o tempo zero obtido para o traço de referência ( $a/c=0,3$ ) com os tempos obtidos para os demais traços contendo diferentes teores de PSA (0,1%; 0,2% e 0,3%), observa-se que ocorre um aumento do tempo zero com o acréscimo de polímero na mistura. Tais resultados estão ilustrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Resultados do tempo zero para os microconcretos de relação  $a/c = 0,3$  e diferentes teores de PSA, com os respectivos teores de superplastificantes (MORAES e CERQUEIRA (2014))

Traço	Tempo Zero	Teor de Superplastificante
0,3_REF	7h 54min	2,6%
PSA_0,1	8h 24min	2,6%
PSA_0,2	8h 12min	3,0%
PSA_0,3	8h 48min	3,2%

## 2.3 NANOSSÍLICA (NS)

Nanopartícula é uma partícula microscópica cujo tamanho é medido em nanômetros (nm), onde pelo menos uma de suas dimensões é menor do que 200 nm (REPORT NANOTECHNOLOGY AND CONSTRUCTION, 2006). As nanopartículas mostram propriedades físicas e químicas diferentes de materiais convencionais e por isso vem ganhando atenção. Podem ser aplicados em vários campos da indústria visando a obtenção de novos materiais, com propriedades superiores e com maiores possibilidades de aplicações. O uso de nanopartículas em materiais cimentícios tem recebido atenção especial com o propósito de se obter concretos e argamassas com propriedades superiores, principalmente resistência mecânica e durabilidade (DANTAS, 2013).

A sílica é o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e tem origem mineral, biogênica ou sintética. Na natureza, existe abundantemente na sua forma mais estável, o quartzo, constituinte principal de areias e rochas. Também é encontrada, em quantidades menores, em plantas como arroz, bambu e cevada, e em quantidades maiores, em terras diatomáceas (ANDRADE, 2015).

A obtenção de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  pode ser feita por diversos processos e, dependendo dessa forma e das condições de obtenção, podem apresentar propriedades diferentes, como o tamanho da partícula e sua reatividade.

Nas argamassas e nos concretos convencionais, já há a presença da sílica. Entretanto, sua adição em nanoescala proporciona um maior adensamento da massa, melhorando assim sua porosidade e resistência.

De acordo com GLEIZE (2011), a nanossílica (NS) é considerada uma adição pozolânica altamente reativa que, em substituição ao cimento tem acarretado na melhoria da resistência dos materiais cimentícios e no aumento da resistência à penetração de água, o que influencia fortemente na durabilidade do concreto. Esse material demonstra ser mais eficiente no ganho de resistência do que a sílica ativa. Além de proporcionar o efeito fíler para melhorar a microestrutura de concretos e argamassas, também funciona como um ativador para a reação pozolânica e como pontos de nucleação, contribuindo para a hidratação do cimento. Esse comportamento leva a uma melhora na microestrutura com refinamento dos poros que incrementa as propriedades mecânicas dos concretos e argamassas.

### **2.3.1 APLICAÇÕES EM MEIOS CIMENTÍCIOS**

A aplicação de nanossílica em materiais cimentícios, mesmo em baixas proporções em relação ao aglomerante total, melhora de uma forma geral a microestrutura desses materiais (GLEIZE, 2011). A nanossílica possui propriedades melhores do que a sílica ativa, pois possui uma superfície específica maior, fazendo com que a sua reação pozolânica ocorra de forma mais acelerada (LI *et al.*, 2004).

Ainda não existe um consenso sobre a quantidade ideal de nanossílica a ser utilizado nas misturas de matriz cimentícia. Alguns autores afirmam que as porcentagens adequadas deveriam ser baixas, variando entre 1% até 3%, enquanto outros afirmam que o teor deveria estar entre 3% e 5%. Existem ainda autores que usaram teores de até 12% (LI *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2012; FERNÁNDEZ *et al.*, 2013; HOU *et al.*, 2012).

De acordo com AÏTCIN (1998), a adição de nanossílica apresenta duas formas de atuação: uma física e uma química. A primeira diz respeito à atuação do material como fíler, desse modo, as partículas dispersam-se nos espaços entre os grãos de cimento, provocando uma distribuição uniforme dos produtos de hidratação e contribuindo, assim, para uma estrutura mais densa, portanto com menor permeabilidade e maior resistência. A atuação química se dá pela ação como pozolana de alta reatividade, dessa maneira, a adição reage rapidamente com o  $\text{Ca(OH)}_2$  liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos resistentes de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que tendem a preencher os vazios capilares.

Como salienta MORAES (2001), a incorporação de elementos finos à pasta de cimento melhora o empacotamento da mistura, já que partículas finas se posicionam nos espaços entre os demais componentes do material, preenchendo os vazios da mistura. No entanto, quanto a isto, existem algumas ressalvas em relação à nanossílica, já que as partículas extremamente finas da substância tendem a formar aglomerados, podendo prejudicar a densidade da pasta (DANTAS, 2013).

### **2.3.2 EFEITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**

Os estudos que visaram analisar a influência da adição de nanossílica nas propriedades mecânicas do concreto apresentaram maior enfoque na análise da resistência à compressão. Esses indicaram que tal adição conduziu a um aumento dos resultados de resistência à

compressão quando comparado aos materiais sem adição ou com adições de sílica ativa. (FERNANDEZ *et al.*, 2013; SANCHEZ e SOBOLEV, 2010).

É mostrado na Figura 2.8 que a incorporação de nanossílica tem um efeito mais evidente na resistência à compressão nas primeiras idades. HOU *et al.* (2013) mostram que, para a mistura com 5% de nanossílica, a resistência à compressão aumentou em 16% e 45%, em 3 e 7 dias, respectivamente, em relação a uma mistura referência. Enquanto isso, o aumento da resistência das misturas com 5% de sílica ativa nestas mesmas idades foram inferiores a 10%, em relação à mistura referência. No entanto, o ganho de resistência de ambas as pozolanas nas idades mais avançada não apresentam grandes diferenças. Verificou-se ainda que, com 84 dias de hidratação, as misturas com 5% de nanossílica e 5% de sílica ativa apresentaram resistência abaixo da mistura de referência, o que pode ser explicado pelo fato da reação pozolânica ter consumido maior parte da sílica amorfa destes materiais, bem como o hidróxido de cálcio advindo da hidratação do cimento, em idades anteriores (HOU *et al.*, 2013)

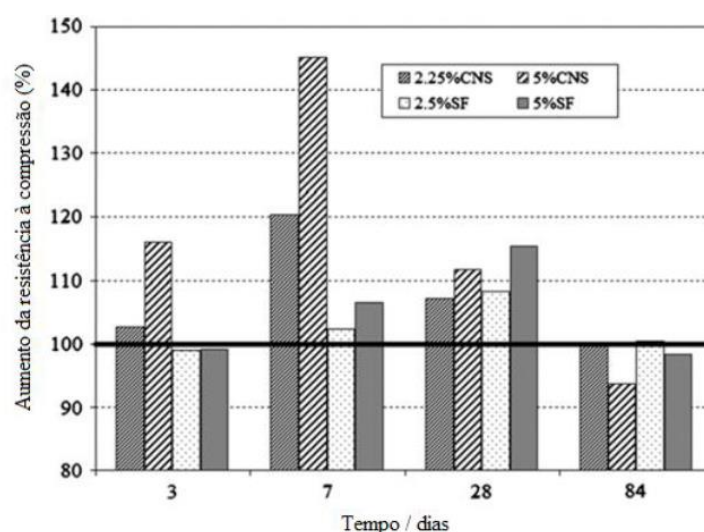


Figura 2.8: Efeito da melhoria na resistência à compressão das misturas com incorporação de nanossílica (CNS) e sílica ativa (SF), em relação à resistência (HOU *et al.*, 2013).

SHIH *et al.* (2006) adicionaram nanopartículas de sílica na forma de dispersão coloidal com diâmetro médio de 20 nm no cimento e verificaram as mudanças na microestrutura da pasta. As propriedades mecânicas foram melhoradas, chegando a um aumento de 43% de resistência à compressão com adição de apenas 0,6% de nanossílica em relação à massa de cimento.

Estes autores afirmaram que as reações pozolânicas entre o hidróxido de cálcio e sílica amorfa (dióxido de silício), normalmente ocorrem lentamente, durante um período



prolongado de cura. Uma vez que as partículas esféricas de nanossílica têm um diâmetro médio de partícula de cerca de 20 nm, que é cerca de 1000 vezes mais finas do que partículas de cimento médio de 20  $\mu\text{m}$ , resultando em uma área de superfície muito grande, a nanossílica reage muito rapidamente com o hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado em um meio alcalino. Por esta razão, a contribuição de nanossílica adicionada ao aumento da resistência da pasta de cimento endurecida se torna evidente bem cedo e mais ainda, 14 dias após a hidratação.

Eles definiram que dentre todas as idades de cura, o valor ótimo de concentração, ou seja, a concentração de nanossílica que apresentou os maiores valores de resistência à compressão, foi 0,6%. Sendo a idade de 56 dias a que apresentou a maior resistência. Com 0,8% os valores de resistência à compressão caíram para valores inferiores aos de 0,6% de adição (DANTAS, 2013).

MOHAMMADMEHDI *et al.* (2012) estudaram o efeito da adição de nanossílica em pastas de cimento Portland e perceberam uma redução na água livre, permeabilidade e porosidade devido à formação do gel de silicato de cálcio (C-S-H), que possui uma estrutura mais densa, além do efeito fíler das nano partículas que tendem a ocupar os espaços vazios entre as fases presentes. KONTOLLEONTOS *et al.* (2012), observaram um aumento da resistência à compressão com o aumento de dias de cura e atribuiu isso ao consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por nanossílica (evolução de hidratação). Segundo os autores, com base nos resultados dos ensaios de resistência à compressão, é esperado que a nanossílica comporte-se não só como material de enchimento para melhorar a microestrutura do cimento, mas também como um promotor de reação pozolânica.

Segundo KONTOLLEONTOS *et al.* (2012), as nanopartículas de sílica atuam como locais de nucleação para a precipitação de produtos de hidratação (especialmente  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Em idades posteriores, a nanossílica modifica a estrutura interna do gel C-S-H, e o aumento do comprimento médio das cadeias de silicatos, o que resulta em uma estrutura mais densa.

### **2.3.3 EFEITO NO TEMPO ZERO**

Na linha de pesquisa a qual este trabalho se insere, este é o primeiro que visa determinar o tempo zero de microconcretos contendo adição de nanossílica, lembrando que foi feito em paralelo com a dissertação de mestrado de SANTOS (2016). Logo não há, dentro dessa linha, referências anteriores sobre o efeito dessa adição no tempo zero. Com isso,

partiu-se para análises por correlações com pesquisas que estudaram os efeitos da adição de nanossílica em materiais cimentícios.

Para a maioria dos trabalhos, à medida que a nanossílica é adicionada a mistura reduz o tempo de pega do cimento e aumenta a taxa de liberação de calor, pois o  $\text{Ca(OH)}_2$  reage com a nanossílica e as misturas se mostram mais consistentes (ANDRADE, 2015).

BJORNSTROM *et al.* (2004), destacam a aceleração da hidratação do cimento devida à altíssima área superficial da substância, que forma pontos de nucleação para produção de C-S-H.

KONG *et al.* (2013) mostra que a adição de aglomerados de nanossílica leva a uma aceleração da hidratação do cimento. Tal conclusão pode ser analisada na Figura 2.9, a seguir, a qual demonstra que as curvas referentes aos traços com adição apresentaram um antecipação e aumento do pico de temperatura em relação ao traço referência.

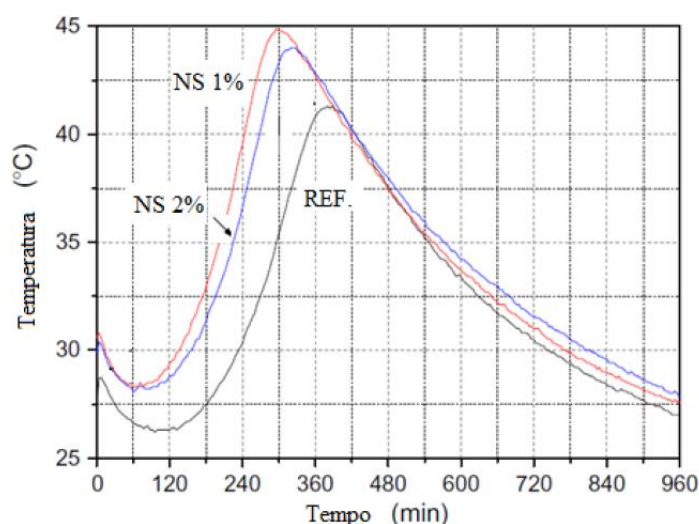


Figura 2.9: Resultados da calorimetria em pastas de cimento com nanossílica,  $a/c = 0,30$  (KONG, et al, 2013).

CHOO LAEI (2012) estudou os efeitos da nanossílica nas propriedades físicas de tubos de concreto para armazenagem de petróleo. No seu artigo, os resultados indicaram que o uso da nanossílica levou a uma redução do tempo de pega e do tempo de dormência para argamassas.

A conclusão de que a nanossílica leva a uma redução do tempo de pega também foi verificada por SNEFF *et al* (2009). Os pesquisadores afirmam que as amostras com adição de NS apresentaram uma redução no tempo de trabalhabilidade, no tempo de pega e no momento em que se atinge a temperatura máxima da argamassa de, respectivamente, 33%, 60% e 51,3% quando comparados a exemplares sem nanossílica.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi realizado no laboratório de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia, para determinação do tempo zero utilizando a técnica do pulso ultrassônico nos microconcretos de alta resistência estudados.

A metodologia abordada nesta pesquisa foi proposta por SILVA (2007), de acordo com a norma ABNT NBR 8802:1994, e utilizada por autores que seguem a sua linha de pesquisa, desenvolvida na Universidade de Brasília – REGO e AKITAYA (2011), PEREIRA e MATOS (2011), CLARO e SARAIVA (2013), ORDÓÑEZ (2013), TRALDI e AGUIRRE (2013) e MORAES e CERQUEIRA (2014).

Esta pesquisa visa determinar o tempo de transição suspensão-sólido de seis misturas de microconcreto de alta resistência ( $a/c$  fixa = 0,3): duas contendo apenas adição de nanossílica – de 1% e de 2% – e outras quatro combinando-se os teores de 1% e 2% de nanossílica com os teores de 0,2% e 0,3% de polímero superabsorvente. Além destas, outras três misturas, realizadas por MANZANO (2014), foram utilizadas como referência para posterior comparação dos resultados, totalizando nove misturas. São estas misturas: uma de referência com relação  $a/c = 0,3$  (sem adições de PSA ou NS) e duas contendo apenas adição de polímero superabsorvente nos teores de 0,2% e de 0,3%. Vale salientar que os teores das adições descritos nessa pesquisa sempre se referem a porcentagem em relação a massa de cimento (Tabela 3.1).

Os traços foram escolhidos com o objetivo de se avaliar a influência da adição de nanossílica no tempo zero dos concretos de alta resistência com adição de PSA (com função de cura interna). Para isso todas as misturas foram feitas com a mesma relação  $a/c$ , e dois teores de cada adição foram adotados.

Anteriormente a fabricação dos traços no laboratório de Furnas, o ajuste dos mesmos foi efetuado no laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) de modo a se obter a dosagem de superplastificante de cada mistura que resultam em um espalhamento fixo de  $(190 \pm 10)$  mm no cone da norma DIN 18555-2. Logo, o teor de superplastificante é variável para que o espalhamento seja fixo e o  $a/c$  ficassem fixos.

Deve-se atentar também à necessidade de adição de água extra para cura interna do polímero devido à absorção por parte do PSA, que depende do teor da adição. A água extra para cura interna, porém, não foi considerada como acréscimo na  $a/c$ . Ademais, a nanossílica

utilizada trata-se de uma solução aquosa de sílica coloidal com teor de sólidos de 30%, com isso há a necessidade de se corrigir a água a ser adicionada para atingir a relação a/c, descontando-se a água presente na solução de sílica.

Tabela 3.1: Nomenclatura e descrição dos microconcretos fabricados neste programa e já desenvolvidos anteriormente por MANZANO (2014) e que serão utilizados como referência para comparação.

Nomenclatura	Descrição da mistura			Observação
	Relação a/c	Teor de NS (%)	Teor de PSA (%)	
REF	0,3	0,0	0,0	Já realizado anteriormente
PSA 0,2	0,3	0,0	0,2	Já realizado anteriormente
PSA 0,3	0,3	0,0	0,3	Já realizado anteriormente
NS 1	0,3	1,0	0,0	Parte desse programa
NS 2	0,3	2,0	0,0	Parte desse programa
NS 1 – PSA 0,2	0,3	1,0	0,2	Parte desse programa
NS 1 – PSA 0,3	0,3	1,0	0,3	Parte desse programa
NS 2 – PSA 0,2	0,3	2,0	0,2	Parte desse programa
NS 2 – PSA 0,3	0,3	2,0	0,3	Parte desse programa

### 3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES

#### 3.1.1 CIMENTO

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP V – ARI RS, fabricado pela CIPLAN, proveniente da mesma partida de fabricação. O cimento CP V – ARI foi proposto por ser o tipo usual em estudos de concreto de alta resistência. Os ensaios de caracterização física, mecânica e química do cimento utilizado nesta pesquisa foram realizados no Laboratório de Furnas. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Caracterização química do cimento.

Composição química		Teores (%)	Limites NBR 5733	Referência normativa
Perda ao fogo		1,82	$\leq 4,5$	NBR NM 18:2012
Resíduo insolúvel		0,79	$\leq 1,0$	NBR NM 15:2012
Trióxido de Enxofre - $\text{SO}_3$		3,28	*	NBR NM 16:2012
Óxido de Magnésio - $\text{MgO}$		4,36	$\leq 6,5$	NBR NM 11-2:2012
Dióxido de Silício - $\text{SiO}_2$		24,41	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Ferro - $\text{Fe}_2\text{O}_3$		3,02	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Alumínio - $\text{Al}_2\text{O}_3$		7,09	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Cálcio - $\text{CaO}$		53,44	-	NBR NM 11-2:2012
Óxido de Cálcio livre - $\text{CaO}$ livre		2,16	$\leq 3,0$	NBR NM 13:2012
Sulfato de Cálcio - $\text{CaSO}_4$		2,16	-	NBR NM 16:2012
Álcalis Totais	Óxido de Sódio - $\text{Na}_2\text{O}$	0,29	-	NBR NM 17:2012
	Óxido de Potássio - $\text{K}_2\text{O}$	0,77	-	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	0,80	-	NBR NM 17:2012
Álcalis solúveis em água	Óxido de Sódio - $\text{Na}_2\text{O}$	0,18	-	NBR NM 17:2012
	Óxido de Potássio - $\text{K}_2\text{O}$	0,64	-	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	0,60	-	NBR NM 17:2012

Tabela 3.3: Propriedades determinadas por ensaios no laboratório de Furnas para o cimento utilizado.

Propriedades determinadas		CP V – ARI RS	Limites (NBR 5733:1991)	Referência normativa
Tempo de pega	Início (h:min)	2:30	$\geq 1:00$	NBR NM 65:2003
	Fim (h:min)	3:10	$\leq 10:00$	NBR NM 65:2003
Água de consistência – pasta (%)		32,4	---	NBR NM 43:2003
Expansão em autoclave (%)		0,03	---	ASTM C151
Resistência à compressão	1 dia (MPa)	32,1	$\geq 14,0$	NBR7215:1996
	3 dias (MPa)	37,2	$\geq 24,0$	NBR7215:1996
	7 dias (MPa)	41,8	$\geq 34,0$	NBR7215:1996

### 3.1.2 ÁGUA

A água utilizada é a obtida pelo sistema de abastecimento público, fornecida pela SANEAGO nos ensaios de Furnas S.A. e pela CAESB nos ensaios de dosagem no LEM/UnB. Não foram efetuadas análises na água utilizada em ambos os locais.

### 3.1.3 AREIA

O agregado miúdo utilizado na produção dos microconcretos foi areia natural lavada proveniente do depósito aluvial do Rio Corumbá, na região de Pires do Rio – GO. A escolha do agregado miúdo baseou-se na distribuição granulométrica, sendo preferida uma composição contínua. O ensaio da composição granulométrica foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) e as demais características foram analisadas pelo laboratório de Furnas. Na Figura 3.1 é mostrada a distribuição granulométrica da amostra selecionada, que se apresentou dentro dos limites da zona utilizável da norma ABNT NBR 7211:2011.

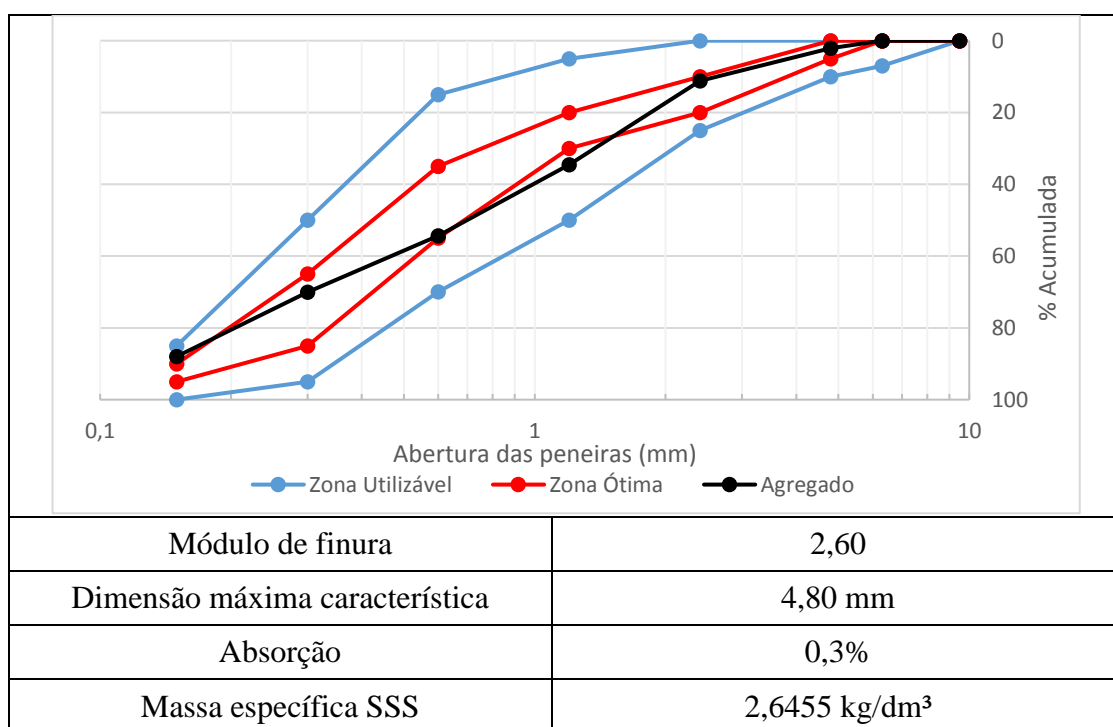


Figura 3.1: Curva granulométrica da areia utilizada

A umidade superficial da areia foi calculada em todos os dias de ensaio, momentos antes da realização do mesmo, através do Frasco de Chapman.

### 3.1.4 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa utilizada na fabricação dos microconcretos é nacional, do tipo não densificada. Conforme recomendado pela RILEM (2012), utilizou-se o teor de 10% em relação à massa do cimento. Os ensaios de caracterização física e química, realizados no Laboratório de Furnas, estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Caracterização da sílica ativa.

Propriedade		Teores (%)	Limites NBR 13956:2012	Método de Ensaio
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,21	-	NBR NM 23:2001
Perda ao fogo		3,22	≤ 6,0	NBR NM 15:2012
Óxido de Magnésio - MgO		0,49	-	NBR 13956:2012
Dióxido de Silício - SiO <sub>2</sub>		93,55	≥ 85	NBR 13956:2012
Óxido de Ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,16	-	NBR 13956:2012
Óxido de Alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,15	-	NBR 13956:2012
Óxido de Cálcio - CaO		0,37	-	NBR 13956:2012
Álcalis totais	Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	0,26	-	NBR NM 17:2012
	Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O	0,85	-	NBR NM 17:2012
	Equivalente alcalino	0,82	≤ 1,5	NBR NM 17:2012

### 3.1.5 SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo químico utilizado nesta pesquisa foi o Glenium® 51, fornecido pela BASF SE, do tipo Redutor de água de grande eficiência (superplastificante de 3ª geração), a base de policarboxilato e de pega normal (SP II - N), segundo a classificação da ABNT NBR 11768:2011. Na Tabela 3.5 são apresentadas as características físico-químicas do aditivo empregado na pesquisa, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.5: Características físico-químicas do Superplastificante Glenium® 51

Característica	Resultado
Base química	Eterpolicarboxilato
Aspecto	Líquido viscoso
Cor	Branco turvo
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 – 1,107
pH	6
Teor de sólidos (%)	30
Teor de cloretos	Isento

### 3.1.6 POLÍMERO SUPERABSORVENTE (PSA)

O polímero superabsorvente utilizado no trabalho foi doado pelo Prof. Ole Mejlhede Jensen e desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). Quimicamente falando, trata-se de um ácido acrílico/acrilamida com ligações cruzadas covalentes, produzido pela técnica de polimerização por suspensão inversa (JENSEN E HANSEN, 2001). Na Tabela 3.6 são apresentadas algumas propriedades do PSA utilizado na pesquisa.

Os ensaios utilizados na caracterização do PSA não são normatizados, as metodologias realizadas foram propostas por pesquisadores da área. Descrições mais detalhadas dos ensaios, procedimentos e pesquisadores que os propuseram podem ser encontrados em MANZANO (2014) e NETO (2014).

Tabela 3.6: Características do PSA estudado (MANZANO, 2014).

Característica	Método	Resultado
Massa específica	Picnômetro	1,456 g/ml
Absorção em meio aquoso	Proveta graduada	95,8 g/g
	Microscópio ótico	80,3 g/g
Absorção em meio cimentício	<i>Slump-flow</i>	15 g/g

Dentre essas características, a absorção em meio cimentício mostra-se como a de maior importância, haja vista que é utilizada no cálculo da quantidade de água ser adicionada para cura interna do PSA.



### 3.1.7 NANOSSÍLICA (NS)

A nanossílica utilizada na pesquisa é a Cembinder® 30, da fabricante AkzoNobel and Eka Chemicals S.A. O material foi escolhido devido às suas características físicas e químicas, e considerando a existência prévia de fornecedor no Brasil. Trata-se de uma solução aquosa de sílica coloidal com teor de sólidos de 30%.

A Tabela 3.7 mostra as principais características da NS fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.7: Características físicas e químicas da NS utilizada (AKZONOBEL, 2013).

Propriedade	Valor
Natureza química	Sílica amorfa
Apresentação – estado físico	Solução aquosa coloidal – líquido
Cor – odor	Claro/ligeiramente turvo – odor suave
Teor de sílica (%)	30
Tamanho aproximado das partículas	~ 5 nm
pH	10,5 (9 -11)
Viscosidade (MPa.s)	< 50
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,2
Teor NaO <sub>2</sub> (%)	0,55

## 3.2 FABRICAÇÃO DOS MICROCONCRETOS

A relação a/c utilizada foi de 0,3; tal traço foi proposta pelo comitê organizador TC 225-SAP (RILEM, 2012) e está demonstrada na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Composição do microconcreto de referência (RILEM, 2012).

Componente	Consumo (Kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CP V ARI	700,00
Sílica Ativa (10% em relação à massa do cimento)	70,00
Agregado miúdo – Areia lavada de rio (SSS)	1339,80
Água (relação a/c = 0,30)	210,00

Como já citado; nos traços contendo PSA, foi adicionada a água de cura interna do polímero (não foi considerada como acréscimo da relação a/c) calculada com a absorção do PSA no meio cimentício (15 g/g) e a massa do polímero seco para cada mistura. Já nos traços contendo NS foi calculada a água a ser descontada considerando-se o teor de sólidos de 30%,

com isso a porcentagem de solução aquosa de sílica coloidal adicionada é, respectivamente 3,34% e 6,67% para se obter as adições de 1% e 2% de nanossílica.

É importante ressaltar que o traço foi calculado para a areia na condição SSS, por isso fez-se necessário determinar a umidade da areia utilizada em cada concreto e corrigir os quantitativos de água e de areia. A determinação dessa umidade superficial foi realizada usando-se o Frasco de Chapman (ABNT NBR 9775:2011) instantes antes da produção dos microconcretos.

Os materiais aglomerantes e os agregados foram pesados, identificados e armazenados em tambores, numa sala climatizada ao abrigo do vento e do sol, com a finalidade de manterem-se as características de umidade e temperatura. O armazenamento dos materiais secos pode ser observado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Modo de armazenamento dos materiais secos: (a) cimento e (b) areia.

A Tabela 3.9 apresenta a composição dos microconcretos.

Tabela 3.9: Composição dos microconcretos

TRAÇO	Materiais secos (kg/m³)				Nanossílica				Água (kg/m³)		SP	
	Cimento	Sílica Ativa	Areia	PSA	Teor total (%)	Peso total (kg/m³)	Teor pura (%)	Peso pura (kg/m³)	Água	Água de cura do PSA	Teor (%)	Peso (kg/m³)
REF	700	70	1340	-	-	-	-	-	210	-	2,6	18,2
PSA02	700	70	1340	1,4	-	-	-	-	210	21,0	3,0	21,0
PSA03	700	70	1340	2,1	-	-	-	-	210	31,5	3,2	22,4
NS1	700	70	1340	-	3,3	23,4	1	7	210	-	3,0	21,0
NS2	700	70	1340	-	6,7	46,7	2	14	210	-	3,5	24,5
NS1- PSA02	700	70	1340	1,4	3,3	23,4	1	7	210	21,0	3,2	22,4
NS1- PSA03	700	70	1340	2,1	3,3	23,4	1	7	210	31,5	3,5	24,5
NS2- PSA02	700	70	1340	1,4	6,7	46,7	2	14	210	21,0	3,5	24,5
NS2- PSA03	700	70	1340	2,1	6,7	46,7	2	14	210	31,5	3,9	27,3

Os materiais constituintes do traço (agregados, cimento, sílica ativa e água) foram pesados em balança digital com precisão de 0,01 kg. Já o aditivo superplastificante e o SAP foram pesados em balança digital com precisão de 0,01 g, mostrada na Figura 3.3.

Inicialmente, apenas os materiais secos (cimento, areia, sílica ativa e PSA) foram misturados na betoneira. Após esse procedimento, os constituintes líquidos do traço (superplastificante e nanossílica), já pré-misturados na água de amassamento, foram adicionados uniformemente à betoneira.



Figura 3.3: Balanças utilizadas para as pesagens dos materiais: (a) balança para grandes massas (precisão de 0,01 kg) e (b) balança para pequenas massas (precisão de 0,01 g)

Os microconcretos foram misturados em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 600 litros (Figura 3.4), porém, devido ao pequeno volume de material necessário para os ensaios, de 40 a 50 litros, a betoneira foi utilizada sempre próxima a sua capacidade mínima.



Figura 3.4: Betoneira utilizada para a mistura.

O roteiro de mistura para a produção dos microconcretos é baseado nas recomendações do Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012) para realização dos ensaios. Na Tabela 3.10 é apresentada a sequência de colocação dos materiais na betoneira e os tempos de mistura.

Tabela 3.10: Roteiro de mistura dos microconcretos.

Tempo (minutos)	Ação	Duração da etapa (minutos)
0:00 – 4:00	Homogeneização dos componentes secos (incluso o PSA)	4 min.
4:00 – 5:00	Adição de água, incluindo o SP e NS pré-dissolvidos	1 min.
5:00 – 8:00	Mistura inicial	3 min.
8:00 – 9:00	Raspagem dos materiais presos na parede/pás do misturador	1 min.
9:00 – 12:00	Mistura final	3 min.

Esse roteiro é apenas teórico, já que se dá preferência à obtenção do espalhamento especificado. Com isso, após a mistura dita como final, caso o concreto ainda não tenha atingido o espalhamento desejado, este pode ser misturado por mais tempo. A inspeção da consistência é feita, inicialmente, de maneira visual até que se perceba uma maior fluidez da massa. Então a mistura deve ser interrompida para se fazer o ensaio de espalhamento e verificar o valor pré-definido.

O método utilizado foi o do tronco de cone de Hagermann sem aplicação de golpes na mesa (DIN 18555-2), especificado pelo Comitê TC 225-SAP (RILEM, 2012). O ensaio consiste na colocação do microconcreto no tronco de cone em duas camadas, cada uma recebendo 10 golpes uniformemente distribuídos com soquete normal. Logo após o adensamento, o tronco de cone é levantado lentamente e o concreto então flui (se espalha) sobre a base, sendo então este espalhamento medido com o auxílio de um paquímetro em duas direções ortogonais. O ensaio de espalhamento é mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Ensaio de espalhamento.

### 3.3 ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRASSÔNICO

Após a mistura de cada um dos traços propostos neste programa experimental, foi moldado um corpo de prova para a realização ensaio de propagação do pulso ultrassônico. As dimensões deste corpo de prova foram propostas por SILVA (2007), seguindo as prescrições da ABNT NM 58:1996, da ABNT NBR 8802:2013 e da RILEM NDT 1 (1972), que estabelece as dimensões em função da frequência do transdutor, como apresentado na Tabela 3.11. A frequência dos transdutores do aparelho utilizado é de 54 kHz e os limites estabelecidos para o corpo de prova são: entre 200 e 1500 mm para a dimensão longitudinal e 150 mm para a transversal.

Tabela 3.11: Frequência natural do transdutor de acordo com as dimensões da peça a ser ensaiada (RILEM NDT 1, 1972 apud SILVA, 2007).

Distância a ser percorrida pela onda (mm)	Frequência natural do transdutor (kHz)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)
100 – 700	$\geq 60$	70
200 – 1500	$\geq 40$	150
> 1500	$\geq 20$	300

As dimensões adotadas para o molde foram tais que a seção transversal do corpo de prova fosse de 150 mm por 150 mm e seu comprimento longitudinal fosse de 300 mm. Além disso, o molde apresenta um furo em cada uma de suas faces laterais de menor seção, tendo este 50 mm de diâmetro. Vale salientar, ainda, que o material do molde são chapas de compensado de madeira plastificado, por ser barato, mas pode ser feito com chapa de aço, cuja durabilidade é incomparavelmente maior.

Antes mesmo da moldagem do corpo de prova, os transdutores são acoplados nos furos nas faces do molde, faceando a fôrma internamente e, para garantir o perfeito contato destes com o microconcreto, sem que o aparelho seja danificado, é aplicado biogel próprio para ultrassom na parte dos transdutores que estarão em contato com o microconcreto.

Parte-se então para a moldagem do corpo de prova, a qual foi realizada em duas camadas sendo cada uma delas adensadas manualmente com 30 golpes por meio de um soquete, conforme ilustrado na Figura 3.6.



Figura 3.6: Moldagem do corpo de prova e adensamento



Após moldado, o corpo de prova tem sua superfície coberta com filme plástico e fita adesiva, de modo a evitar qualquer troca de umidade com o meio externo. A Figura 3.7 mostra o corpo de prova devidamente embalado e pronto para a conexão com o equipamento de ultrassom.



Figura 3.7: Corpo de prova embalado com filme plástico e fita adesiva

Após preparado, o corpo de prova é posto em uma sala climatizada com temperatura fixa igual a 21°C e com umidade relativa constante. Os transdutores do equipamento, já acoplados nos furos nas faces do molde, são então ligados ao equipamento de ultrassom. A Figura 3.8 ilustra tal ligação.



Figura 3.8: Equipamento utilizado no ensaio de propagação do pulso eletrônico, com corpo de prova acoplado.

O equipamento utilizado no laboratório de Furnas é o Pundit Lab, da marca PROCEQ (Figura 3.8), o qual foi programado para realizar leituras a cada três minutos durante 48 horas pelo software Pundit Link. Assim obtém-se a curva de velocidade de propagação das ondas em função do tempo transcorrido após a conexão com o equipamento. De posse de tal curva, é possível se determinar o momento em que ocorre a transição do estado fluido para o estado sólido do concreto. Vale salientar que o tempo zero é caracterizado pelo intervalo a partir da adição de água ao cimento até a formação do patamar de percolação, o qual é definido pelo momento em que o gráfico apresenta uma ascensão notável.

A Figura 3.9 resume esquematicamente a realização do ensaio de maneira geral.

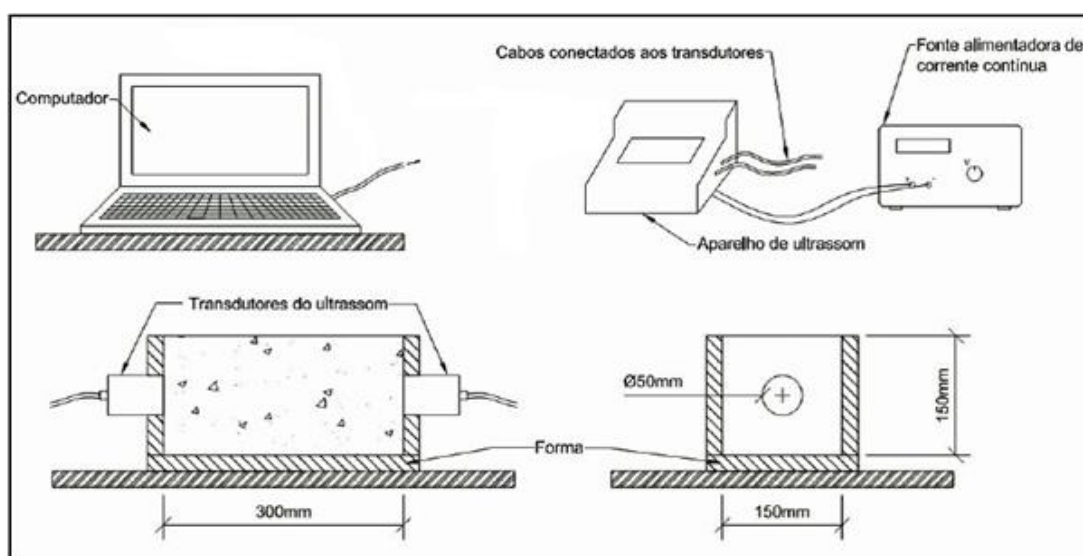


Figura 3.9: Esquema ensaio de determinação do Tempo Zero ( $t_0$ ) pelo método do pulso ultrassônico (SILVA et al., 2011a)



## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios dos nove traços estudados, sendo três deles já realizados por MANZANO (2014) e os seis restantes realizados nesta pesquisa, conforme já mencionado no programa experimental.

A partir da análise de tais resultados faz-se a avaliação dos efeitos decorrentes das adições propostas neste trabalho, investigando, assim, a influência isolada de cada adição e de suas combinações no tempo zero, comparando-as com o traço de referência e entre si.

### 4.1 TEMPO ZERO

A aquisição de dados é feita de maneira automática pelo equipamento e registrada em tempo real pelo computador. Dentre outros parâmetros, o programa disponibiliza a velocidade do pulso ultrassônico e o número da leitura, a qual foi estabelecida a cada três minutos. Com estes valores, pode-se obter uma relação da velocidade do pulso em função do tempo transcorrido.

A medida fornecida pelo equipamento, porém, apenas leva em consideração o tempo a partir da ligação do equipamento ao corpo de prova, e não desde a adição de água ao cimento. Todavia, este tempo – da adição de água ao início das medições ( $T_A$ ) – deve ser imprescindivelmente computado, haja vista que as reações de hidratação se iniciam a partir do momento em que a água é adicionada ao cimento.

Dessa forma, foi feito um ajuste dos dados somando-se esse tempo –  $T_A$  – às medidas fornecidas pelo equipamento. Ajustou-se também as velocidades obtidas com o intuito de se reduzir variações experimentais no traçado da curva, tornando sua leitura mais clara.

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas de velocidade dos nove traços deste estudo, já realizados os ajustes citados anteriormente.

As curvas obtidas apresentam comportamento padrão para esse tipo de ensaio, conforme já citado no item 2.1.2 – referente a tempo zero. As quatro fases previstas podem ser nitidamente observadas, sendo elas o período inicial de dormência, o aumento brusco da velocidade, o aumento gradual, porém desacelerado, da velocidade de propagação da onda e a estabilização assintótica da curva.

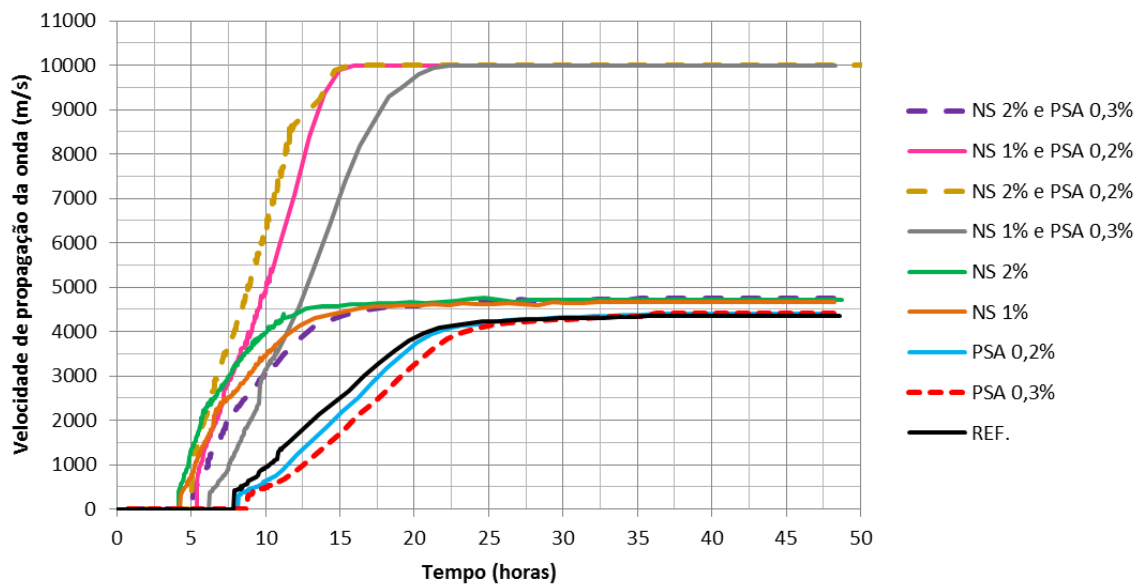


Figura 4.1: Curvas de velocidade da onda ultrassônica em função do tempo para os microconcretos analisados.

Já a Tabela 4.1 e a Figura 4.2 retratam um resumo dos resultados dos ensaios de tempo zero e o comportamento das curvas nas primeiras 10 horas de ensaio, para uma melhor interpretação do tempo zero. A Tabela 4.1 expõe ainda uma comparação percentual dos resultados, tomando como referência o traço realizado por MANZANO (2014) sem adições (REF).

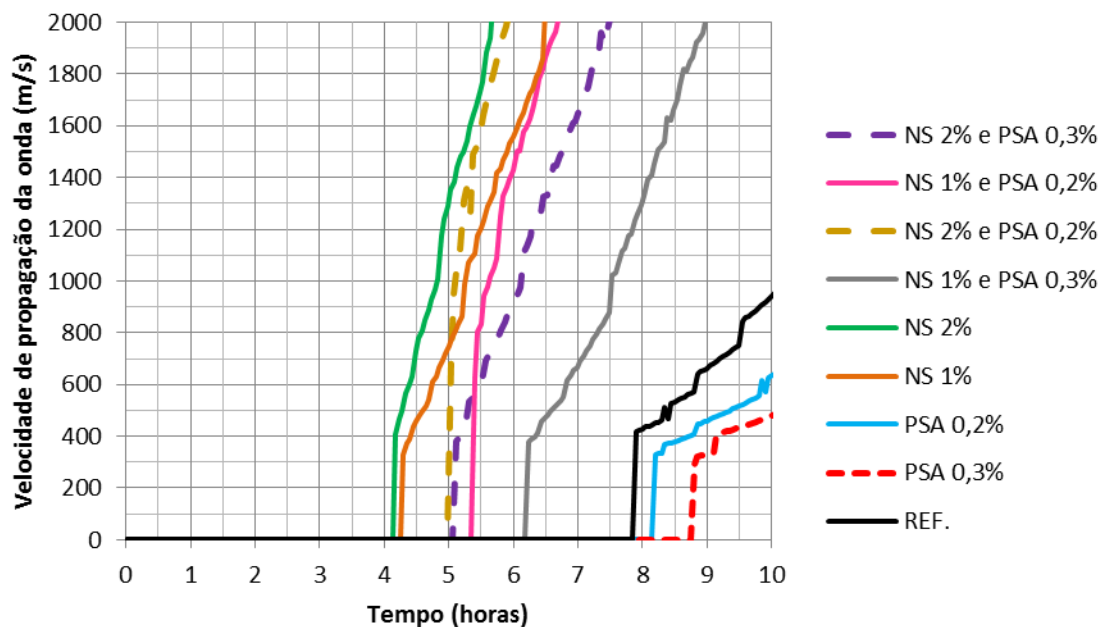


Figura 4.2: Curvas de velocidade da onda ultrassônica nas primeiras 10 horas de idade.

Tabela 4.1: Tempo zero das misturas estudadas.

Nomenclatura	Tempo zero (t0)	% em relação ao traço de referência	Teor de superplastificante
REF	7 h 54 min (474 minutos)	100 %	2,6 %
PSA 0,2	8 h 12 min (492 minutos)	104 %	3,0 %
PSA 0,3	8 h 48 min (528 minutos)	111 %	3,2 %
NS 1	4 h 18 min (258 minutos)	54 %	3,0 %
NS 2	4 h 11 min (251 minutos)	53 %	3,5 %
NS 1 – PSA 0,2	5 h 24 min (324 minutos)	68 %	3,2 %
NS 1 – PSA 0,3	6 h 14 min (374 minutos)	79 %	3,5 %
NS 2 – PSA 0,2	5 h 02 min (302 minutos)	64 %	3,5 %
NS 2 – PSA 0,3	5 h 07 min (307 minutos)	65 %	3,9 %

## 4.2 INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PSA AO MICROCONCRETO

A influência da adição de PSA ao microconcreto pode ser observada na Tabela 4.1 citada no item 4.1, a qual indica os valores de tempo zero, a comparação em relação ao traço de referência e o teor de superplastificante, em relação à massa de cimento, de cada traço. Atenta-se que o teor de SP dos microconcretos precisou variar para se alcançar o espalhamento fixado de  $190 \pm 10$  mm com uma a/c estabelecida em 0,30. Nos traços contendo PSA, mesmo com a adição de água extra para cura interna, ainda assim foi necessário o aumento no teor de SP para alcançar o espalhamento desejado.

São apresentadas na Figura 4.3 as curvas de velocidade da onda ultrassônica *versus* tempo para os traços REF., PSA 0,2 e PSA 0,3 com o intuito de avaliar o efeito da adição do polímero isoladamente no tempo zero dos microconcretos.

Foi observado; para o traço PSA 0,2, um tempo zero de 8h 12min e um teor de superplastificante de 3,0%, representando respectivamente um aumento de 4% e 15% em relação ao traço REF (cujo tempo zero foi de 7h 54min e o teor de superplastificante de 2,6%). Já para o traço PSA 0,3, observou-se um tempo zero de 8h 48min e um teor de superplastificante de 3,2%, equivalendo respectivamente, a um aumento de 11% e 23% em relação ao traço REF.

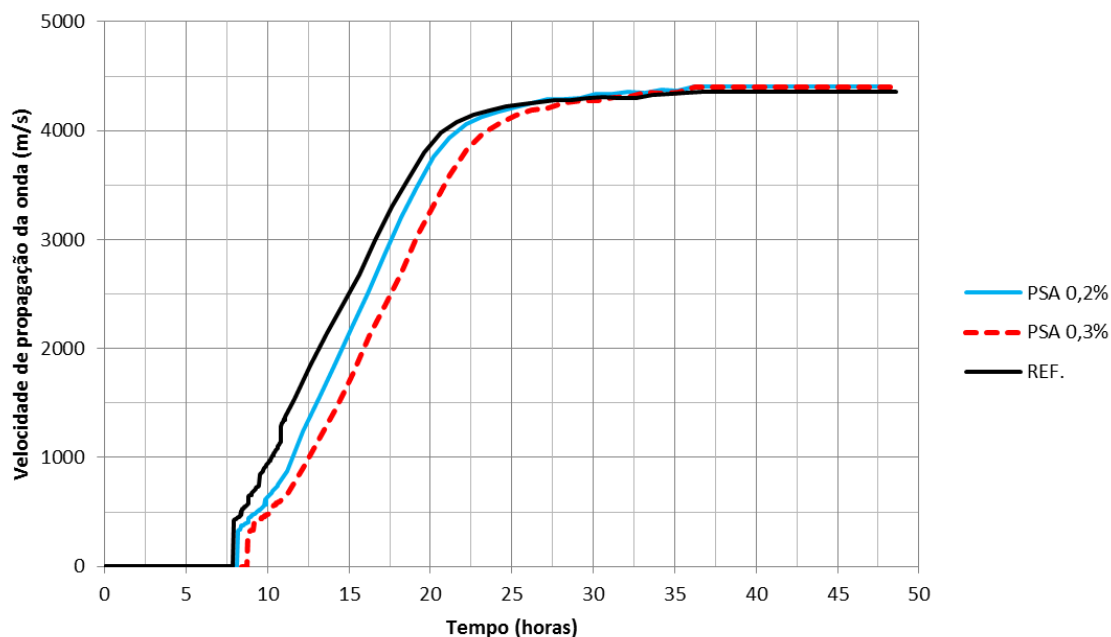


Figura 4.3: Curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços contendo apenas PSA e do traço referência.

Partindo-se dessas informações, verifica-se um aumento do tempo zero com o crescimento dos teores de polímero (PSA) e superplastificante. Esse comportamento é esperado para a adição de ambos os aditivos, não sendo possível determinar a influência específica de cada um destes no tempo zero do microconcreto. Mesmo o aditivo SP sendo de pega normal (SP II – N), o teor usado na pesquisa foi expressivamente superior ao recomendado pelo fabricante (até 1,0 %), o que pode provocar retardo na pega.

Confirmando a pesquisa de ORDÓÑEZ (2013), o atraso no tempo de pode ser devido à adição de água para cura interna, provocando o afastamento das partículas de cimento umas das outras.

Outra provável justificativa para este aumento, já citado por MANZANO (2014), MORAES e CERQUEIRA (2014) e SANTOS (2016), é a alta concentração de aditivo superplastificante adicionada à mistura. Haja vista que este aditivo tem como mecanismo duplo de ação dispersante (repulsão eletrostática e repulsão estérica), tendo esta combinação um alto poder de afastamento das partículas de cimento, dificultando assim a formação do patamar de percolação.

Analisando-se ainda a velocidade final das curvas, verifica-se um comportamento compatível com o sugerido por MORAES e CERQUEIRA (2014), que propõe que, uma vez as partículas do polímero tendo liberado a água para cura interna e essa água tenha sido aproveitada nas reações de hidratação, as misturas passam a apresentar um comportamento

próximo por possuírem a mesma relação água/cimento, supondo que a água para cura interna não eleve a relação água/cimento da mistura, e os mesmos componentes.

### 4.3 INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOSSÍLICA AO MICROCONCRETO

A influência da adição de NS ao microconcreto também pode ser observada na Tabela 4.1 citada no item 4.1. Atenta-se que o teor de SP dos microconcretos precisou variar para se alcançar o espalhamento fixado de  $190 \pm 10$  mm com uma a/c estabelecida em 0,30. Nos traços contendo NS, o aumento da área específica necessitou elevar a dosagem de SP em relação ao traço de referência para atingir um mesmo espalhamento.

Na Figura 4.4 é apresentado um gráfico contendo as curvas de velocidade da onda ultrassônica para os traços REF., NS 1 e NS 2 com o intuito de avaliar o efeito da adição da nanossílica isoladamente no tempo zero dos microconcretos.

Foi observado; para o traço NS 1, um tempo zero de 4h 18min e um teor de superplastificante de 3,0%, representando respectivamente uma diminuição de 46% e um aumento de 15% em relação ao traço REF. Já para o traço NS 2, observou-se um tempo zero de 4h 11min e um teor de superplastificante de 3,5%, equivalendo respectivamente a uma diminuição de 47% e um aumento de 35% em relação ao traço REF.

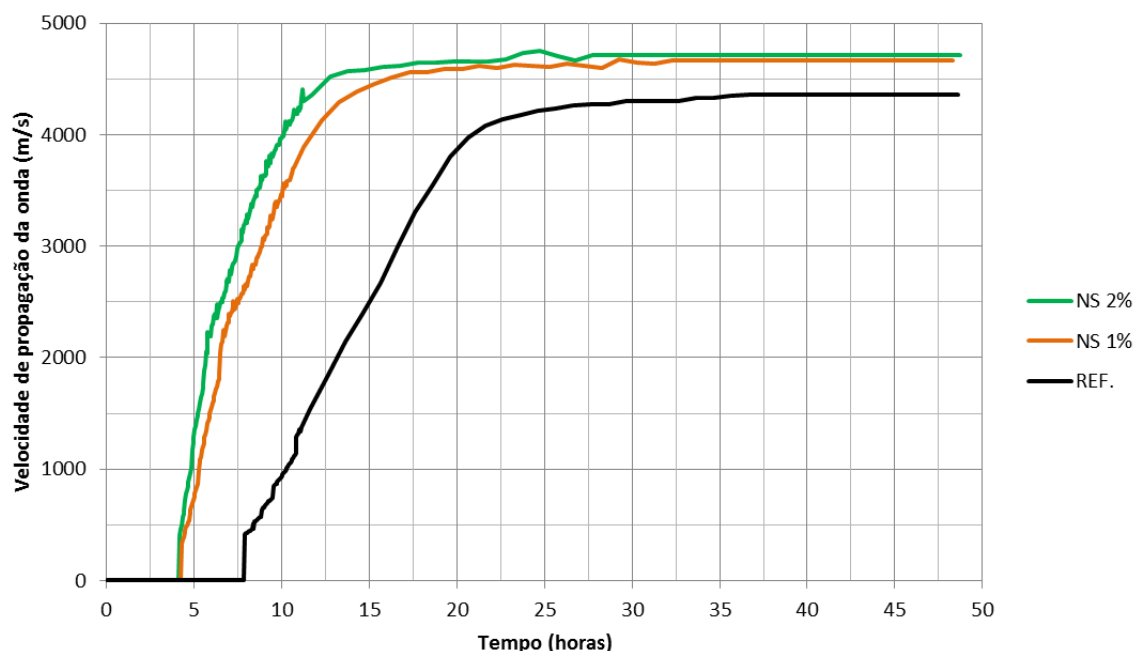


Figura 4.4: Curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços contendo apenas nanossílica e do traço referência.

Partindo-se dessas informações, verifica-se uma diminuição do tempo zero com a adição de nanossílica. Esse comportamento é esperado para essa adição, pois, como

referenciado anteriormente no item 2.3.3, tal material acelera a hidratação do cimento, funcionando como pontos de nucleação para o C-S-H, como ativador para acelerar a reação pozolânica e pela sua elevada superfície específica.

Segundo ANDRADE (2015), à medida que a nanossílica é adicionada a mistura reduz o tempo de pega do cimento e aumenta a taxa de liberação de calor, pois o  $\text{Ca(OH)}_2$  reage com a nanossílica e as misturas se mostram mais consistentes. Ademais, SCRIVENER e KIRKPATRICK (2008) afirmam que a NS não só atua pelo do efeito fíler de refinamento dos poros, mas também como um ativador para acelerar as reações pozolânicas do compósito.

De acordo com Björnström *et al.* (2004), ainda não foi estabelecido se a hidratação mais rápida do cimento na presença de NS é devido à sua reatividade química mediante dissolução (atividade pozolânica) ou à elevada área superficial.

Vale ressaltar que mesmo com a tendência do superplastificante em aumentar o tempo zero do microconcreto, notou-se uma diminuição desse tempo. Tal fato pode ser explicado devido à maior influência da nanossílica nesse comportamento.

O valor atingido pela velocidade final de propagação de onda ultrassônica depende da evolução da fração de volume de sólido total. Assim, a maior velocidade atingida pelos traços com adição de nanossílica em relação ao traço REF. pode ser explicada pelo fato dessas misturas possuírem uma fração sólida maior.

#### **4.4 INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO COMBINADA DE PSA E NANOSSÍLICA AO MICROCONCRETO**

A influência da adição combinada de PSA e NS ao microconcreto também pode ser observada na Tabela 4.1 citada no item 4.1. Na Figura 4.5 são apresentadas as curvas de velocidade da onda ultrassônica *versus* tempo para os traços REF., NS 1 – PSA 0,2; NS 1 – PSA 0,3; NS 2 – PSA 0,2; NS 2 – PSA 0,3.

Foi observado; para o traço NS 1 – PSA 0,2 um tempo zero de 5h 24min e um teor de superplastificante de 3,2%. Para o traço NS 1 – PSA 0,3 observou-se um tempo zero de 6h 14min e um teor de superplastificante de 3,5%. Para o traço NS 2 – PSA 0,2 observou-se um tempo zero de 5h 02min e um teor de superplastificante de 3,5%. Para o traço NS 2 – PSA 0,3, observou-se um tempo zero de 5h 07min e um teor de superplastificante de 3,9%.

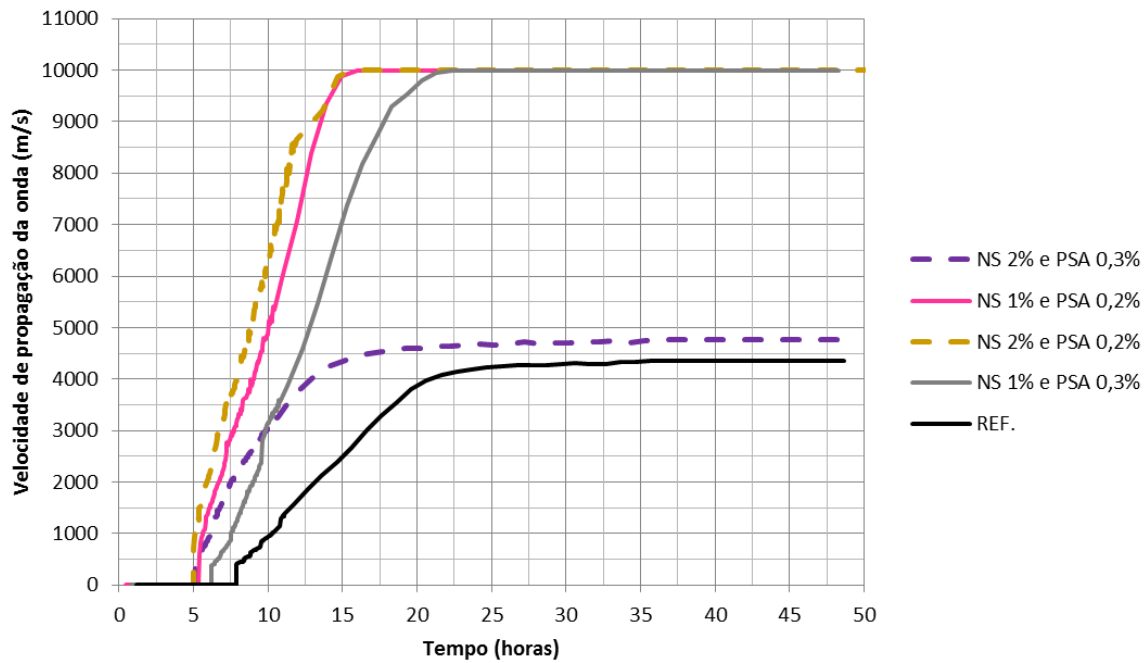


Figura 4.5: Curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços referência e dos contendo adição combinada de nanossílica e de PSA.

Pela análise das figuras, é possível afirmar que o comportamento está de acordo com os resultados das análises anteriores. Haja vista que é perceptível uma redução no tempo zero devido à tendência da NS em diminuir o tempo zero ser superior à do PSA em aumentá-lo.

A Figura 4.6 apresenta as curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços REF. e com teor de nanossílica 1% para as primeiras 10 horas de ensaio. Já a Figura 4.7 apresenta as curvas de velocidade da onda ultrassônica dos traços REF. e com teor de nanossílica 2% para as primeiras 10 horas de ensaio. Esses serão utilizados para a análise das adições combinadas.

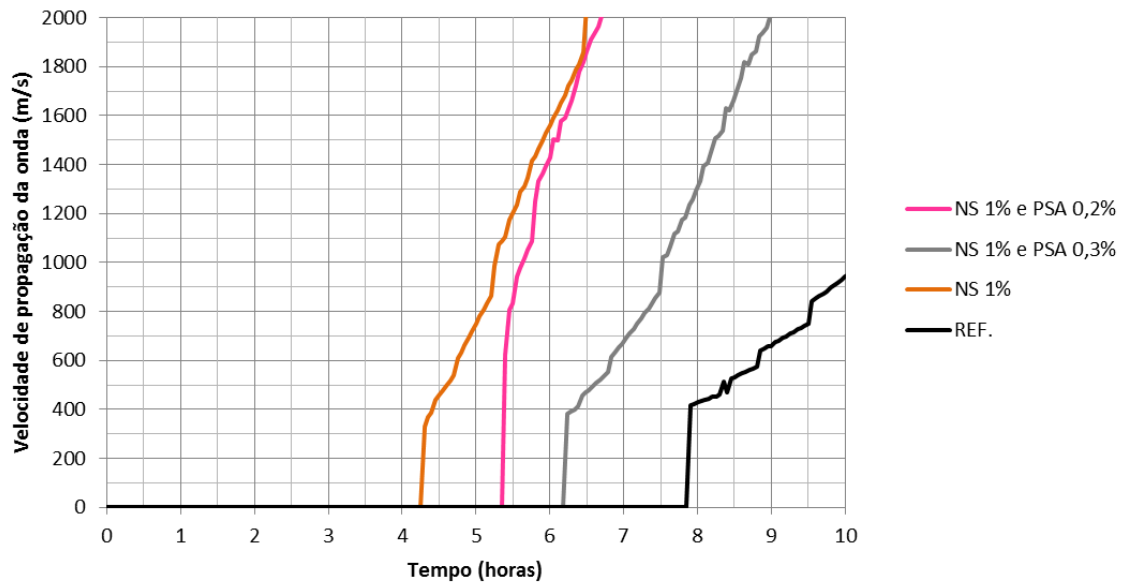


Figura 4.6: Curvas de velocidade da onda ultrassônica nas primeiras 10 horas de ensaio dos traços referência e dos contendo adição combinada de nanossílica (1%) e de PSA (0,2% e 0,3%).

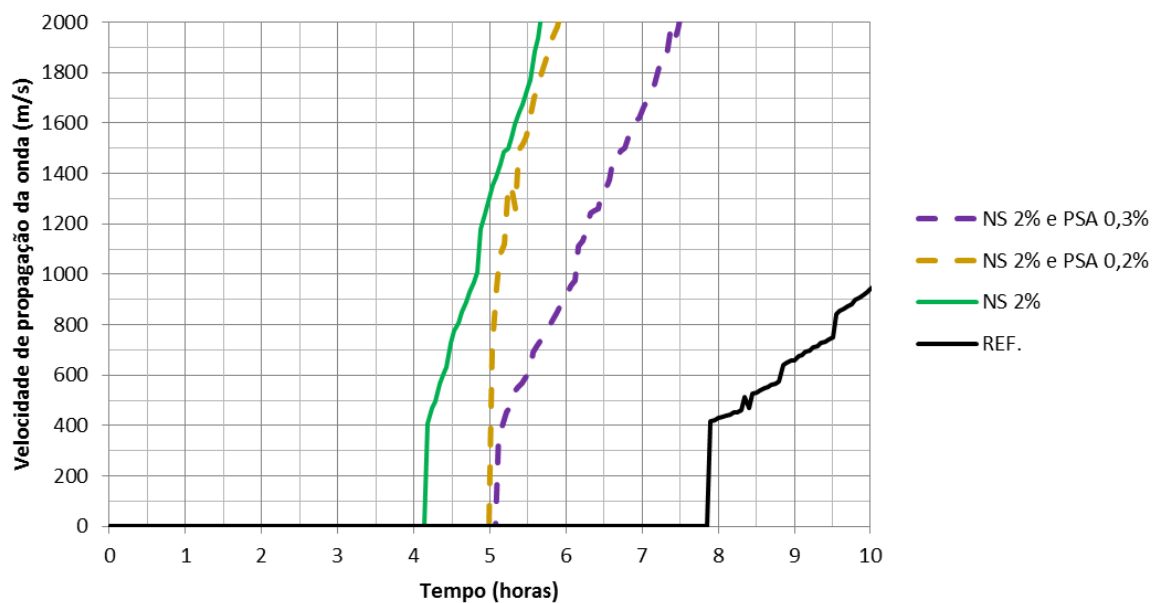


Figura 4.7: Curvas de velocidade da onda ultrassônica nas primeiras 10 horas de ensaio dos traços referência e dos contendo adição combinada de nanossílica (2%) e de PSA (0,2% e 0,3%).

Tomando-se, inicialmente, os traços que apresentam adição de NS igual a 1%; identificou-se uma redução do tempo zero de 46% para o traço NS 1, de 32% para o NS 1 – PSA 0,2 e 21% para o NS 2 – PSA 0,3 em relação ao traço REF. Verifica-se, dessa forma, que embora a adição de NS tenha reduzido o tempo zero, o efeito do PSA em elevá-lo ainda é relevante.



Para os traços com adição de NS igual a 2% a análise anterior também é válida. Haja vista que para o traço NS 2 em relação ao traço REF houve uma redução no tempo zero de 47%; para o NS 2 - PSA 0,2, redução de 36%; e para o NS 2 – PSA 0,3, redução de 35%.

Comparando-se ainda os resultados das curvas presentes nas Figura 4.6 e Figura 4.7, observa-se que com o aumento do teor de NS há um aumento na redução do tempo zero, mantendo-se fixo o teor de PSA. Com isso, fica clara a influência do teor de nanossílica na redução do tempo zero. É válido notar que, nas proporções utilizadas, as adições não levaram a uma alteração suficiente no tempo zero a ponto de prejudicar o tempo de produção dos microconcretos.

Para as curvas de velocidade do pulso ultrassônico das misturas contendo adições combinadas de NS e PSA, esperava-se um comportamento da velocidade final semelhante às demais, porém observou-se que três traços de combinações atingiram uma velocidade consideravelmente maior que as demais, sendo que apenas uma apresentou comportamento normal. Tal disparidade, possivelmente, se deve a um erro de programação do equipamento, porém perceptível apenas em seu comportamento após a mudança brusca da velocidade, não havendo indícios para suspeitar dos dados referentes ao tempo zero.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 SINOPSE E CONCLUSÃO

Esse trabalho faz parte da linha de pesquisa de concreto de alta resistência desenvolvida na Universidade de Brasília e, dentro dessa, tem como objetivos a determinação do tempo zero e a investigação da influência neste das adições de diferentes teores de polímero superabsorvente e nanossílica.

Para a obtenção dos dados necessários a essa análise foi utilizada a técnica de propagação de ondas ultrassônicas com o uso do aparelho de ultrassom, no laboratório de Furnas.

Os resultados indicam uma clara influência das adições no tempo zero. A nanossílica leva a uma grande diminuição desse – de até 47% –, sendo que para a maior dosagem desse material, foi observado um maior efeito no comportamento analisado. Isso devido ao fato de tal material acelerar a hidratação do cimento, funcionando como pontos de nucleação para o C-S-H, como ativador para acelerar a reação pozolânica e através da sua elevada superfície específica.

Quanto à adição de PSA, essa levou a um aumento do  $t_0$  – de até 11% –, sendo que para a maior dosagem desse material, foi observado um maior efeito no comportamento analisado. Entretanto, não é possível afirmar que tal resultado provém apenas da adição de PSA, haja vista que o alto teor de superplastificante pode afetar o tempo zero.

Analisando então as combinações das adições, observou-se que a capacidade do PSA em aumentar o valor do tempo zero não foi perdida em frente à adição de NS. Os efeitos dessas adições são ainda intensificados com o aumento de seus teores, ocorrendo então a superposição dos efeitos.

A comparação dos resultados foi dificultada pelo alto teor de superplastificante que foi utilizado para manter os índices de espalhamento fixados. A dificuldade em se manter a trabalhabilidade se deve ao fato do PSA possuir uma granulometria muito fina e ao fato da NS levar a um aumento do empacotamento causado pelo efeito fíler.

## **5.2 SUSGETÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Recomenda-se para pesquisa futuras, inicialmente, a repetição dos traços NS 1 – PSA 0,2; NS 1 – PSA 0,3 e NS 2 – PSA 0,2, dos quais se espera a confirmação de que a alteração na velocidade final das ondas ultrassônicas não acarretou defasagem na determinação do tempo zero.

Indica-se ainda o estudo de traços com teor fixo de superplastificante, não tomando como parâmetro a trabalhabilidade do microconcreto. Tais traços poderão indicar o real efeito das adições de PSA e NS, pois não haverá diferença na influência causada pelo superplastificante entre os traços.

Também com intuito de se reduzir a influência dos superplastificantes, pode-se optar pelo uso de concretos com relação a/c superior a 0,30, por apresentarem maior trabalhabilidade.

Ademais, indica-se o estudo dos traços considerando o aumento da relação a/c devido à água de cura interna liberada pelo PSA durante a hidratação do concreto. Alguns autores já atentaram para tal fato recomendando uma diminuição da água de amassamento, de modo a compensar a adição desse volume de água. Objetivando-se, assim, eliminar possíveis interferências, já que a quantidade de água na mistura interfere no tempo necessário para a formação do patamar de percolação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 58: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ACKER, P. Comportement mécanique du béton: Rapport de Recherche LCPC, apports de l'approche physico-chimique, N° 152, 1998.

AÏTCIN, P.C. Curing high performance concrete to minimize shrinkage: High-performance concrete Series 5. 1 ed. E. & FN Spon, 1998.

AKZONOBEL. Cembinder® for the construction industry: Colloidal silica dispersions – uses and benefits. Netherlands: AkzoNobel and Eka Chemicals S.A., 2013.

ANDRADE, D. S. Microestrutura de Pastas de Cimento Portland com Incorporação de Nanossílica Coloidal e Adições Minerais Altamente Reativas. Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2015.

BALTHAR, V. K. B. L. Retração Autógena E Evolução De Propriedades Mecânicas De Pastas Pozolânicas. Dissertação – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2004.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Composites, Denmark, 26, 2004.

BJÖRNSTRÖM, J., MARTINELLI, A., MATIC, A., BÖRJESSON, L., PANAS, I. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement, Chemical Physics Letters, v. 392, n. 1-3, 2004.

CAMPOS, T. Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland. Dissertação do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2009.

CHOO LAEI, M.; RASHIDI, A. M; ARDJMAND, M.; YADEGARI, A.; SOLTANIAN, H., The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement, Materials Science and Engineering A 538 (2012) 288– 294.

CLARO, G. P. P.; SARAIVA, L. M. Contribuição ao estudo da retração autógena em concretos de alta resistência. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2012.

CRAEYE, B., DE SCHUTTER, G. Experimental evaluation of autogenous shrinkage by means of a vertical dilatometer for concrete: RILEM Proc. PRO 52 Volume Changes os Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Jensen OM, Lura P, Kovler K (eds) RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux France, 2006.

CUSSON, D., HOOGEVEN, T. Internal curing of high performance concrete with pre soaked fina lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Research, v.38, 2008.

DANTAS, M. H. O. Avaliação dos efeitos da adição nanossílicas em pó e coloidal em pastas de cimento Portland. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia civil e ambiental, PE. 2013.

DIN 18555-2, Testing Of Mortars Containing Mineral Binders - Freshly Mixed Mortars Containing Aggregates Of Dense Structure (heavy Aggregates) - Determination Of Consistence, Bulk Density And Air Content

DUDZIAK, L., MECHTCHERINE, V. “Mitigation of volume changes of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) by using Super Absorbent Polymers”. Second International Symposium on Ultra HighPerformance Concret. 2008.

FERNANDEZ. J. M; DURAN. A; NAVARRO-BLASCO. I; LANAS. J; SIRERA. R; ALVAREZ. J. I. Influence of nanosilica and polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars. *Cement and Concrete Research*. 43. 2013.

FRIEDRICH, S. “Superabsorbent Polymers (SAP)”. *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction*. 2012.

GLEIZE, P. J. P. Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011.

HASPARYK, Nicole Pagan; LOPES, Anne Neiry M.; ANDRADE, Moacir A. S.; SANTOS, Sérgio Botassi. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON. 2007.

HOU, P et al. Modification effects of colloidal nanoSiO<sub>2</sub> on cement hydration and its gel property. *Elsevier, Composites: Part B*, 2013.

HOU, P. *et al.* Effects of colloidal nanoSiO<sub>2</sub> on fly ash hydration. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 10, p. 1095-1103, 2012.

HOU, P.; KAWASHIMA, S.; DAVID, J.; QUIAN, J.; SHAH, S. P. Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash–cement mortar. *Elsevier. Cement & Concrete Composites*, 2013.

IGARASHI, S., WATANABE, A. “Experimental Study on Prevention of Autogenous Deformation by Internal Curing Using Super-Absorbent Polymer Particles”. 2006.

JENSEN, O. M., HANSEN, P. F. “Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background”. 2001.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. “Water-entrained cement-based materials:. Principle and theoretical background”. *Cement and Concrete Research*, v. 31. 2001.

JENSEN, O.M. Use of superabsorbent polymers in construction materials. 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites 13-15, Nanjing, China. 2008.

JENSEN, O. M.; LURA, P. “Techniques and materials for internal water curing of concrete”. *Materials and Structures*, v. 39. 2006.

KONG, D. et al. Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2013.

KONTOLEONTOS, F. et al. Influence of colloidal nanosilica on ultrafine cement hydration: Physicochemical and microstructural characterization. *Construction And Building Materials*, Athens, n. 35, p.347 - 360, 23 jan. 2012.

KUMM, T.C. Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC. 2009.

LI. G. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research*. 2004.

LI. H, Xiao. H. Ou. J. A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*. 2004.

LI, H.; XIAO, H.; OU, J. A study on mechanical and pressuresensitive properties of cement mortar with nanophase materials. *Cement and Concrete Research*, n. 34. 2004.

LIN, T. H et al. Photocatalytic Decomposition of NO by TiO<sub>2</sub> Particles. *Jornal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 134, 209-217. South Korea. 2008.

LOPES, A. N. D. M. Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura. Porto Alegre: Tese de doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MARCONATO, J. C.; FRANCHETTI, S. M. M. Polímeros Superabsorventes e as Fraldas Descartáveis. Um material alternativo para o ensino de polímeros. 2002.

MANZANO, M. A. R. Estudo Experimental de Microconcretos de Alta Resistência Modificados com Polímeros Superabsorventes (PSA). Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2014.

MECHTCHERINE V, DUDZIAK L, SCHULZE J. Internal curing by super absorbent polymers (SAP) – effects on material properties of self-compacting fibre-reinforced high performance concrete. In: RILEM Proc. PRO 52 Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Jensen OM, Lura P, Kolver K (eds) RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France, 87-96. 2006.

MECHTCHERINE, V., DUDZIAK, L., & HEMPEL, S. “Mitigating early age shrinkage of Ultra-High Performance Concrete by using Super Absorbent Polymers (SAP)”. 90 Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures - CONCREEP-8, T. Tanabe et al. (eds.), Taylor & Francis Group, London. 2009.

METHA, P.K; MONTEIRO, P.J. “Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3 ed. São Paulo: IBRACON. 2008

MOHAMMADMEHDI, C. The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement. Department of Chemical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. 2012.

MONNIG, S. Water saturated superabsorbent polymers used in high strength concrete. Otto Graf Journal 16. 2005.

MORAES. R. C. Efeito Físico e Pozolânico das Adições Minerais sobre a Resistência Mecânica do Concreto. Santa Maria:UFSM, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria. 2001.

MORAES. J. B. ; CERQUEIRA. M. C. Determinação do tempo zero de microconcretos de alta resistência contendo polímeros superabsorventes usando a técnica do ultrassom. Brasília, DF. 2014.

NASSER, R.O. et al. Correlação entre a capacidade de inchamento e as características estruturais de Polímeros Superabsorventes. In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLIMEROS. Anais. 2007

NAZARI. A, RIAHI. S. The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. Composites: Part B. 2011.

NETO, W. N. A., Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação de retração autógena em microconcretos de alta resistência. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

NEVILLE, A., 1997, Propriedades do concreto. São Paulo, 2ª ed., Pini.

ORDÓÑEZ, S.T.L. Mitigação da Retração Autógena em Microconcretos de Alta Resistência com Adição de Polímeros Superabsorventes e Aditivo Redutor de Retração. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-002A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2013.



PEREIRA, D. F. e MATOS, V. N. Combate à retração autógena utilizando polímeros superabsorventes. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2011.

PIÉRARD, J., POLLET, V., & CAUBERG, N. Mitigating autogenous shrinkage in HPC by internal curing using superabsorbent polymers. 2006.

RÊGO, P. I.; AKITAYA, T. A. “Determinação do patamar de percolação através do uso de pulso ultrassônico”. *Monografia de Projeto Final 1*, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2010.

REPORT ON NANOTECHNOLOGY AND CONSTRUCTION, 2006.

RILEM NDT 1. Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. 1972.

RILEM. Application of superabsorbent polymer (SAP) in concrete construction: state of the art report technical committee TC-225-SAP. London: Springer, 2012.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete – A review. Elsevier, Construction and Building Materials. 2010.

SANTOS, T. A .C. Estudo da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanossílica. Qualificação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2015.

SCRIVENER, K. L.; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, Montreal, Canada, 38, n. Special Issue - The 12th International Congress on the Chemistry of Cement, 8 February 2008. 128–136.

SHIH, J. Y.; CHANG, T. P.; HSIAO, T. C. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite Materials Science and Engineering: A, v. 424. 2006.

SENFF L., LABRINCHA J.A., FERREIRA V.M., HOTZA D., REPETTE W.L., Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, Construction and Building Materials 23 (2009) 2487–2491.

SILVA, E. F. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. Rio de Janeiro: Tese de doutorado, Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SOLIMAN, A.M, NEHDI, M.L. Effect of partially hydrated cementitious materials and superabsorbent polymer on early-age shrinkage of UHPC. *Construction and Building Materials* 41, 2013.

STEFANIDOU, M; PAPAYIANNI, I. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on the Portland cement pastes. Elsevier, *Composites*. 2012.

TAZAWA, E., MIYAZAWA, S. Effects of constituents and curing condition on autogenous shrinkage of concrete. *Proceedings of the International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, Hiroshima, Japan. 1999.

TRALDI, C. L.; AGUIRRE, L. M. Polímero superabsorvente (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em microconcretos de alta resistência devido à retração autógena. Brasília: Monografia de Projeto Final de Curso, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2013.

WEISS, J.. Experimental determination of the “time zero” to (maturity-zero Mo), In: *Proceedings of the Early age cracking in cementitious systems – RILEM*, Cachan, France, 2002, edited by A. Bentur. 2002.

ZHANG, M. H.; ISLAM, J.; PEETHAMPARAN, S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. Elsevier, *Cement & Concrete Composites*. 2012.